

自來水會刊第 39 卷第 3 期(155)目錄



實務研究

- 從災害風險管理探討臺北自來水設施減災與整備……………鄭錦澤、范煥英…… 1
- 旱災應變作為之省思—以台水公司2020年抗旱為例……………陳信利、林清鑫、李嘉榮…… 12
- 水庫土霉味(2-MIB及Geosmin)之監測及探討 ……………林彥宏…… 23

本期專題 水質處理

- 以EPANET模擬分析供水管網水質—以北水處內湖分區為例…薛志宏、張凱迪、李佳陵…… 30
- 新店溪原水臭度物質調查與處理方法研究…魏旭毅、曾俊華、蔡松恩、廖睿宏、李育輯…… 42
- 水安全計畫的核心價值—持續確認有效性……………游育晟、何承嶧、吳振榮…… 53
- 淨水場微生物檢測方法比較與分析……………李維旻、李貞慧…… 63

一般論述

- 水中新興污染物—處理技術探討……………張琰琨…… 71
- 草山水道系統歷史演進與運用現況……………陳俊豪…… 78
- 水管橋型式及其應力分析……………曾浩雄…… 86
- 纖維加固管道修復技術……………賴意君…… 97

協會與你

- 歡迎投稿109、110年「每期專題」…………… 96
- 中華民國自來水協會會刊論文獎設置辦法…………… 62

自來水會刊雜誌稿約

- 一、本刊為中華民國自來水協會所發行，係國內唯一之專門性自來水會刊，每年二、五、八、十一月中旬出版，園地公開，誠徵稿件。
- 二、歡迎本會理監事、會員、自來水從業人員，以及設計、產銷有關自來水工程之器材業者提供專門論著、實務研究、一般論述、每期專題、業務報導、專家講座、他山之石、法規櫥窗、協會與您、會員動態、研究快訊、學術活動、出版快訊、感性園地、自來水工作現場、自來水廠(所)的一天等文稿。
- 三、「專門論著」應具有創見或新研究成果，「實務研究」應為實務工作上之研究心得（包括技術與管理），前述二類文稿請儘量附英文題目及不超過 150 字之中英文摘要，本刊將委請專家審查。「每期專題」由本刊針對特定主題，邀請專家學者負責籌集此方面論文予以並列，期使讀者能對該主題獲致深入瞭解。「專家講座」為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。「一般論述」為一般性之研究心得。「業務報導」為國內自來水事業單位之重大工程或業務介紹。「他山之石」為國外新知或工程報導。「法規櫥窗」係針對國內外影響自來水事業發展重要法規之探討、介紹或說明。「研究快訊」為國內有關自來水發展之研究計畫期初、期中、期末報告摘要。「學術活動」為國內、外有關自來水之研討會或年會資訊。「出版快訊」係國內、外與自來水相關之新書介紹。「感性園地」供會員發抒人生感想及生活心得。「自來水工作現場」供自來水從業人員，針對工作現場發表感想。「自來水廠(所)的一天」為提供自來水基層廠(所)的工作現況，增進社會各界對自來水服務層面的認識。「會員動態」報導各界會員人事異動。「協會與您」則報導本會會務。
- 四、惠稿每篇以三千至壹萬字為宜，特約文稿及專門論著不在此限，**本刊對於來稿之文字有刪改權，如不願刪改者，請於來稿上註明**；無法刊出之稿件將儘速通知。
- 五、文章內所引之參考文獻，依出現之次序排在文章之末，文內引用時應在圓括號內附其編號，文獻之書寫順序為：期刊：作者，篇名，出處，卷期，頁數，年月。書籍：作者，篇名，出版，頁數，年月。機關出版品：編寫機構，篇名，出版機構，編號，年月。英文之作者姓名應將姓排在名之縮寫之前。
- 六、本刊原則上不刊載譯文或已發表之論文，投稿之論文不得侵害他人著作權或違反公司及學術倫理等情事，如有違反一切責任由作者自負。
- 七、惠稿(含圖表)請用電子檔寄至 thomas7735tw@mail.water.gov.tw，並請註明真實姓名、通訊地址（含電話及電子郵件地址）、服務單位及撰稿人之專長簡介，以利刊登。
- 八、稿費標準為專門論著、實務研究、一般論述、每期專題、專家講座、法規櫥窗、他山之石、特載等文稿 900 元／千字，「業務報導」為 500 元／千字，其餘為 400 元／千字，文稿中之「圖」、「表」如原稿為新製者 400 元／版面、如原稿為影印複製者，不予計費。
- 九、本刊係屬贈閱，如擬索閱，敬請來信告知收件人會員編號、姓名、地址、工作單位及職稱，或傳真(02)25042350 會務組。本刊將納入下期寄贈名單。
- 十、本會刊內容已刊載於本協會全球資訊網站（www.ctwwa.org.tw）歡迎各界會員參閱。
- 十一、本刊中之「專門論著」、「實務研究」、「一般論述」、「每期專題」及「專家講座」，業經行政院公共工程委員會 92 年 3 月 26 日工程企字第 09200118440 號函增列為技師執業執照換發辦法第五條第一項第四款之「國內外專業期刊」，適用科別為「水利工程科」、「環境工程科」、「土木工程科」。

自來水會刊雜誌

發 行 單 位：中華民國自來水協會

發 行 人：郭俊銘

會 址：臺北市長安東路二段一〇六號七樓

電 話：(02)25073832

傳 真：(02)25042350

中華民國自來水協會編譯出版委員會

主任委員

黃志彬

副主任委員 葉陳萼

委 員

陳明州、李嘉榮、康世芳、王傳政、武經文、
駱尚廉、范煥英、洪世政、李丁來

秘 書 林正隆

自來水會刊編輯部

臺中市雙十路二段二號之一

行政院新聞局出版事業登記證局第 2995 號

總 編 輯：李丁來

執行主編：林正隆

編審委員：甘其銓、周國鼎、鄭錦澤、陳文祥、
黃文鑑、梁德明

執行編輯：曾彥中

電 話：(04)22244191 轉 376

行政助理：黃香蘭

印 刷：松耀印刷企業有限公司

地 址：台中市北區國豐街 129 號

電 話：(04)22386769

從災害風險管理探討臺北自來水設施減災與整備

文/鄭錦澤、范煥英

摘要

據劍橋大學城市風險指標或世界銀行研究報告全球風險分析，臺北或台灣地區面臨災害威脅屬世界最高。從風險管理而言，經此次 COVID-19(簡稱:新冠肺炎)之體驗，藉由減災與整備才是較根本且長期性的災害管理措施。基此，臺北自來水系統設施首先要考量系統上各設施的重要度、緊急性等優先順位，當發現機能狀態低於基準值或趨近使用限界水準時，即需採取相關延壽或更新等措施來進行機能保全，主要評估配合以場站設施與輸配水幹管為主軸。其次，配合環境地質防災工作篩選條件原則分為 6 級管理。依據訂定之整備方法及評價方式針對各系統實施評估，同時納入相關單位之操作維護經驗，以及系統備援備載與施作可行性。自 109 年起訂定 15 年為計畫期程，投入 180 億元。此外，另配合以備援備載、漏水防治、防災應變等三大措施進行減災與整備，以達到穩定供水、管理優化及防災強化等三大目標，並期達韌性供水，永續宜居的臺北。

另為因應傳染病發生的機會與威脅之考驗。配合訂定因應嚴重特殊傳染性肺炎疫情整備應變計畫。相關機關等亦適時訂定因應新冠肺炎防疫標準作業程序與注意事項，以利因應。台北地區因應新冠肺炎，目前淨水處理程序已將出水餘氯調整在 0.60~0.72 mg/L。此外，比較 109 年與 108 年同期，除家庭用水及其他用水增加外，其餘各類別

用水均減少。為減少用戶受疫災之衝擊，規劃提供水費折扣方式如下：1.轄區之營業用戶用水費減收 15%、2.轄區內防疫醫院、採檢院所及防疫旅館，給予用水費減半優惠、3.實施期間配合疫情及北市府等政策滾動式調整。惟疫災應變尚未解除外，又可能面臨複合式災害風險。希望各級應變中心與國人做好相關因應措施。另透過知識管理，以利社會大眾與有識之士持續共同學習成長，以期未來面對多變之災害得到更好風險管理成效。

關鍵字：災害風險管理、韌性供水、COVID-19 新冠肺炎

一、前言

根據劍橋大學賈奇商學院風險研究中心於 2015 年發表「2015-2025 城市風險指標」的調查報告，評估 18 項災害對全球 301 個主要城市在未來 10 年內，各種人為或天然災害可能造成的經濟損失，結果排名前三的城市分別是台北、東京、首爾^[1]。另據報載世界銀行研究報告「自然災害熱點：全球風險分析」曾蒐集近 15 至 25 年的災害事件紀錄^[2]，觀察區域人口及 GDP 暴露在 6 種主要自然災害所承受的風險。風險分為死亡人數和經濟損失，6 種災害包括地震、火山爆發、山崩（土石流）、洪水、乾旱及颱風（西半球稱颶風）。台灣是自然災害高風險地區，同時曝露於 3 項以上自然災害之土地面積與面臨災害威脅人口均超過 9 成，高居世界第一。另依聯合國環境署調適差距報告，至

2030 年或 2050 年，全球氣候調適成本的增加，將可能會遠高於目前的預期。

災害管理 (Disaster Management) 是針對危險情況的一種持續性、動態性的規劃管理過程，以減少危險情況的不確定性及降低災害發生之可能。從「管理」的觀念而言，有關災害種類、預防方法、發生時間、應變方式、復原計畫、政策檢討等，均是災害管理的範疇。災害發生之過程可分為減災、整備、應變、復原四個階段，每階段皆環環相扣，一個階段沒作好，就會影響下一階段的工作。因為從風險管理而言，減災與整備才是較根本且長期性的災害管理措施。

臺北區自來水供水範圍計包括由該系統直接供水之臺北市十二個行政區及新北市所轄三重(二重疏洪道以東)、新店、永和、中和等四區與汐止區之北山、橫科、東勢、宜興、忠山、福山、環河等七里，以及由該系統分水支援供應之淡水、三芝、汐止、深坑、板橋、新莊及蘆洲…等地區。臺北自來水系統至今已營運百餘年，相關設施難免須面臨老舊、劣化及功能衰退等問題，伴隨著近年來因為氣候變遷對環境帶來許多災害，臺灣所處的地理位置所面臨到的挑戰比起其他國家更為嚴峻，地震、颱風、暴雨或乾旱，也持續考驗著臺北自來水系統穩定供水、管理優化及防災應變等能力，因此在嚴峻環境下能維持民生與工商發展的基本供水需求，臺北自來水事業處（以下簡稱：北水處）於 95 年起至 110 年陸續投入 218 億元，建立原水取水備援、提升淨水備載、清水雙線靈活調度、供水分區相互支援，以降低供水風險，提升對於區域內各種突發狀況

之因應能力。亦有利後續進行長期、準確及縝密之相關系統維護評估整備計畫，以減少災害的發生，及不斷地與時俱進，持續精進自來水系統，以提昇供水品質及安全，並為韌性宜居城市共同努力。

二、系統維護評估與整備探討

(一)系統管理維護評估

有關系統管理之維護評估管理計畫策定順序，應考量由系統管理為觀點，進行相關計畫的策定，首先要考量系統上各設施的重要度、緊急性等優先順位，對於設定之計畫目標，在有限的財源下，選定能達成最有效能的方案。尤其在規劃評估大規模的改善案或更新工程，因為需要龐大的資金，更需要依各設施所考量的信賴性，及其合乎要求的維護管理水準，規劃適當的分年分期計畫，以利調整財政負擔，並期避免在短時間內集中支出。進而可以提高整體事業計畫之績效，以利企業整體健全的發展。日本與中華民國自來水協會曾建議相關評估檢討順序與擬訂計畫目標可供參考，進行系統機能綜合的評價、診斷，及對應之效益分析^[3]。

(二)管線結構失能與補強程序評估

美國環保署亦曾建議有關於幹管結構狀況評估和管線重建決策須考量，包括幾個要素：

- 1.該等管線在土壤中物理的模擬。
- 2.了解管線的損壞失能模式及其相關的頻率，包括觀察到的或可量測的符號（或劣化風險的指標），以及指向的劣化機制的潛在推理的指標。
- 3.檢測管線的辨別的指標。

- 4.劣化風險指標解讀，以研判管線的狀態。
- 5.從以往損壞故障進行經驗/統計建模（主要是在小管徑配水幹管）。
- 6.從劣化模式預測未來的損壞故障率，以及管線剩餘壽命。
- 7.評估損壞失能的後果。
- 8.規劃安排管線重建，減少生命週期成本，同時滿足或超過供水功能目標^[4-5]。

評估管線條件時另須注意的不應僅以單一劣化風險指標。相關的信息亦須參考，如土壤性質，環境負荷（氣候，地下水，覆土等），操作營運（陰極保護 CP、洩漏檢測），傳感器監測數據和管線的幾何形狀，以供提昇管線評估成效。相關建議劃分這些因素主要分為三類：物理，環境和操作。物理因子包含：管齡和材料、管壁厚、管的製造年份、管徑、接頭型式、推力克制間隙、管線襯裡和塗層、不同的金屬、管線施工安裝與管線製造。環境因子包含：管溝基礎、溝內回填、土壤類型、地下水、氣候、管位置、擾動、迷走電流、地震活動。操作因子包含：管內水壓力、水錘、洩漏、水質、流速、回流潛勢、操作和維護實際狀況。

有關前兩項因子可進一步分為靜態和動態（或依賴於時間的），靜態因素包括管材、管件的幾何形狀和土壤類型等，而動態的因素包括管齡、氣候和地震活動。操作因素本質上是動態，故不容易衡量或量化。此外，這些因素和管線失能之間的定量關係不容易完全了解，管道狀態評估的實踐相結合使用兩種類型的指標，即劣化風險指標和推理的指標。

(三)系統機能生命週期評估整備探討

考量自來水系統設施及管線隨著使用

時間，需持續進行生命週期盤點及評估檢討^[3]，以了解設施及管線當下的機能狀態(如圖 1)，當發現機能狀態低於基準值(約建設時 60%)或趨近使用限界水準時，即需採取相關延壽(命)或更新等措施來進行機能保全，故整備工作應長期持續進行。

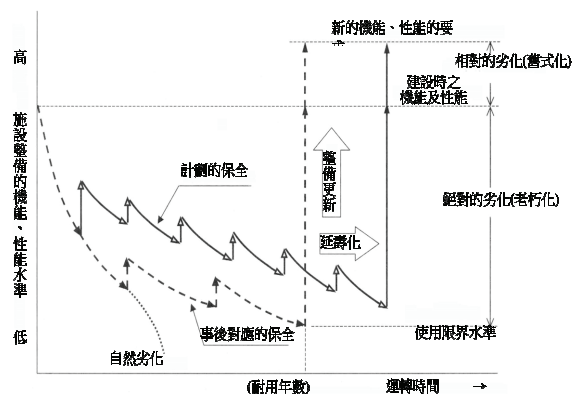


圖 1 系統機能生命週期評估示意圖

此外，亦參考先進國家地區經驗來執行臺北自來水系統整備工作，主要以場站設施與輸配水幹管為評估主軸，藉由計畫訂定 15 年為計畫期程^[6]，並透過 PDCA 循環管理的概念，於每 5 年進行一次檢討，經由計畫性之持續執行運作及滾動式檢討，在穩定供水、管理優化及防災強化三大目標奠基下(如圖 2)，將持續推動自來水系統之整備，以期達成安全、穩定、永續之新世代自來水系統。

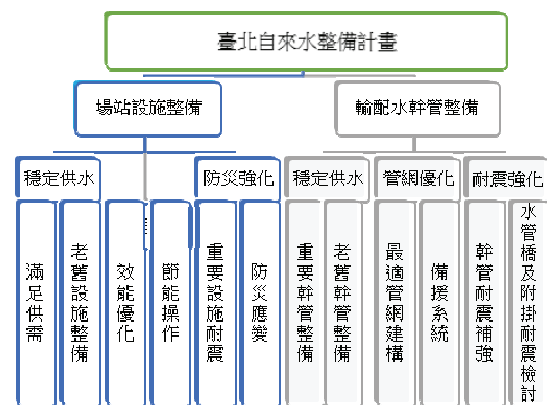


圖 2 臺北自來水整備計畫示意圖

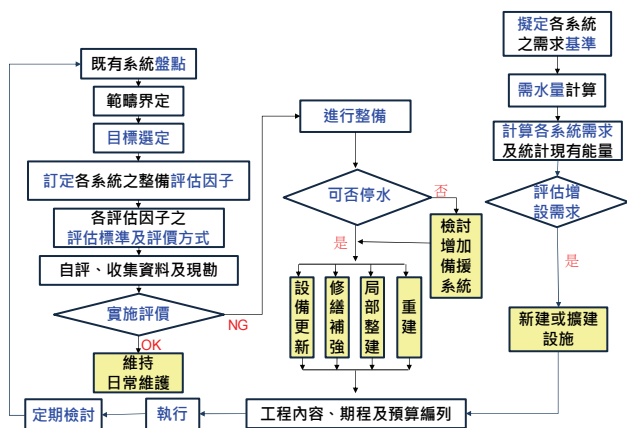


圖 3 場站設施整備評估流程示意圖

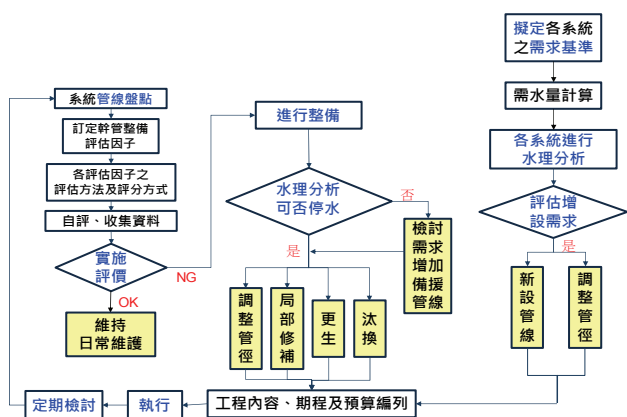


圖 4 輸配水幹管整備評估流程示意圖

在執行自來水系統整備時，亦需進行擬定各系統之需求基準，故首先須進行供水區域之人口及需水量之調查及估算，並依所推估之需水量，依照各系統基準值計算需求，並統計現有能量且進行比較，如現有能量不足將編擬可行之擴建方案，並編列擴建預算及期程。其次於執行整備工作評估方面如圖 3 及圖 4，須針對各系統進行盤點，接續進行整備範疇之界定及目標選定，並將範疇內之各系統進行盤點，並選出將進行整備之目標，並針對各系統研擬及訂定相關整備方法及評價方式，進行整備計畫兩大主軸之決策評估流程，最後則透過相關資料收集及現勘，依據訂定之整備方法及評價方式針對各

系統實施評估，探討停、復水可行性，以及系統備援備載性，或須增加備援系統，同時納入相關單位之操作維護經驗，與施作等可行性，提出最適之整備優先順序、工程內容、期程及預算編列，第一期從 109 年起 5 年計畫投入約 28 億元，並透過工程執行及定期或不定期檢討，以達到臺北自來水整備計畫穩定供水、管理優化及防災強化等三大目標，並期達成韌性供水，永續宜居的城市。

三、系統防災與耐震強化探討

近年來國內 6 級以上大規模地震發生次數頻繁，每當地震發生後，自來水事業單位投入龐大人力及經費搶修、重建毀損的設施。因此，如何提升自來水系統耐震功能，以降低災害帶來的損失，為相當重要課題之一。

(一)環境地質災害潛勢分布評估探討

對於臺北盆地區域，主要需關注土壤液化潛勢情形，分析方法以經驗分析法較為廣泛使用。另以內政部「安家固園計畫」辦理「臺北市土壤液化潛勢圖製作」之初步成果作為評估參考，對於臺北盆地周邊山坡地區域，可能受到山崩、地滑及土石流等災害影響，依據經濟部中央地質調查所於中華民國 105 年 11 月公佈之『地質敏感區基地地質調查及地質安全評估手冊』，相關系統設施如位處山崩與地滑地質敏感區，未來於該區進行改善工程，需進行之詳細基地地質調查及安全評估作業。

為期提升相關防災評估成效，將採用地調所最新公布之山崩與地滑地質敏感區圖資，並蒐集行政院農業委員會水土保持局之

土石流潛勢溪流圖資，以完整涵蓋山崩、順向坡及土石流潛勢溪流之分布區域進行評估。綜合上述圖層資料，將臺北自來水系統圖資套疊後，繪製臺北自來水系統環境地質災害潛勢分布圖，並可據以初步篩選需注意的系統設施，作為後續防治整備與改善之標的對象參考運用。

(二)設施防災工作流程與耐震評估

為利於環境地質防災工作能有效執行，臺北自來水系統設施篩選條件原則將供水設施及管線分為 6 級管理。自來水系統設施環境地質防災之執行原則主要評估流程如圖 5 所示。首先將自來水系統位處高土壤液化潛勢範圍者，以及位處環境地質災害影響範圍者，列為優先更新、評估改善之目標，其次再進一步評估中、低土壤液化潛勢者。重要設施，經上述原則初步篩選盤點，由此篩選方式初步分級後，原則上將再考量設施重要性、現場環境情形及實際需求、視情況進行補充地質調查等改善必要性評估，最後針對有改善必要之設施，辦理詳細基地地質調查，並研擬措施進行補強或改善。台北地區自來水系統重要設施經初步篩選盤點，顯示淨水場建物及淨水場水池遭受環境地質災害影響之機率較低，僅部份配水池及加壓站位於高液化潛勢區需留意。因此，主要將先針對既有老舊建物與設施等構造物之抗液化能力，耐震評估及研擬改善對策。

(三)自來水設施構造物耐震評估

建築物基礎一般可分為直接基礎及樁基礎，依基礎型式不同，液化所造成的破壞類型及損壞程度亦有所不同，其對應的處理

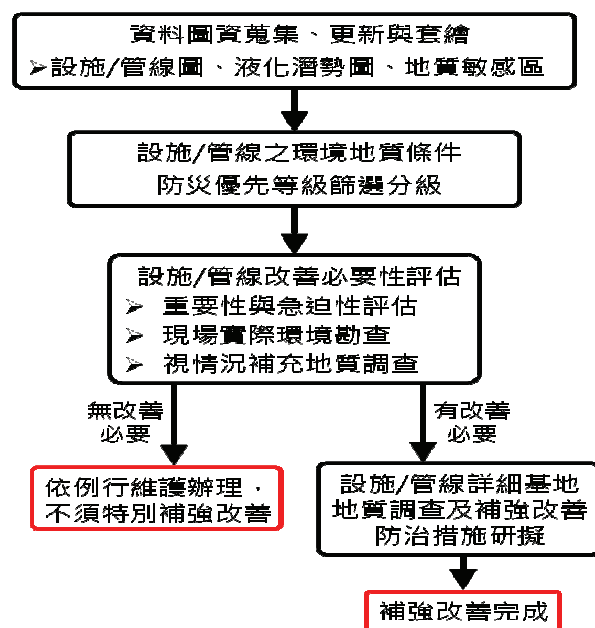


圖 5 設施防災評估流程示意圖

方式主要包含兩種處理方式，一為改良結構物下之土壤性質，防止土壤產生液化；另一為容許土壤液化現象發生，但可藉由結構物強化基礎方式，確保建築結構物之安全，並減輕建築物之災損，達到「小震不壞、中震可修，大震不倒」之目的。此外，早期興建的自來水設施已達使用年限逐漸老化，又因當時對設施耐震標準較低已無法滿足最新之建築物耐震規則，而這些重要設施的結構物如水機房、管理樓、水工構造、池槽、管廊，倘遭遇強震破壞，不僅影響民生供水甚鉅，甚至對附近人員財產安全都有很大的威脅及危害。由於設施的種類繁多，不僅結構形式，包括形狀尺寸、地盤條件等等均會對評估方法造成一定之影響，並無法制定適用於全體之單一評估方法，而其中又以結構系統之影響最大。故以下將設施耐震評估補強作業以結構系統進行區分，分別為以梁柱構架系統為主之建築結構物，及以版牆為主的池狀結構物。

有關於建築物耐震能力初步評估，內政部於 921 地震後即積極推動發展可快速篩選耐震能力不足的建築物的方法，並經內政部建築研究所發展出 PSERCB 初步評估系統，成為國內建築物耐震初評之主要之輔助工具；並提供定性及定量評估結果的報告。對於評估結果為「尚有疑慮」或「確有疑慮」之建築物，則可提供評估或補強建議，以利後續工作之進行。PSERCB 之輸入之基本資料主要來自於竣工圖，若建物因資料佚失，無竣工圖可供引用，則須採現場量測相關結構尺寸，鋼筋量則可利用 PSERCB 之建議數值，仍可獲得具參考性之結果。

不同於房屋建築已有相當完善之耐震能力評估系統可供利用，由於池狀結構系統韌性容量 R 值較低，進行耐震評估之地震力一般均依據「建築物耐震設計規範及解說」第五章「非建築結構物之地震力」計算其設計及最大考量地震力，作為水池之耐震評估基準。惟因該設計規範及解說並未針對池狀結構在地震作用下，儲水動態水壓分佈及計算有所規定，故一般均利用美國混凝土協會之「ACI Seismic Design Of Liquid-Containing Concrete Structures」或「自來水設施耐震設計指南與解說」之相關規定辦理。而有鑒於國內法規之不足，有關國家地震工程研究中心辦理「自來水池狀結構耐震設計規範」已完成規範草案，亦可作為耐震能力評估之依據。

基本上，池狀結構的耐震性分析與檢核計算評估流程，可將作用於池狀結構的地震外力(地震加速度)，一方面轉換成靜態慣性力，來進行靜力分析法；或者將地震歷時波

直接加載於構造物進行動力分析法。而震度法和反應變位法屬於靜力分析法，主要適用於簡單結構系統，分析單純的振動反應。分析時所採用的地震係數(地震加速度) 或者設計反應譜，即是將作用於設施構造物的動態地震外力轉換成靜態慣性力^[7]。

北水處經初步篩選評估 7 棟房屋建築，大部分均無耐震之疑慮，僅一區分處大樓呈現耐震強度不足之情形，建議需再進行詳細評估確認。另一加壓站初步評估結果雖顯示無耐震疑慮，但因加壓站似已有不均勻沉陷之現象，故建議仍應進行詳細評估以確認其安全性。至於水池結構經採簡化計算方式進行初步評估，13 處池狀結構物中有 3 處檢核計算有鋼筋量(略)不足之情形；其中一配水池屬半地下水池，其在滿水狀況下將有耐震之疑慮；另二期加壓站配水池與排砂溢流井則均為地下水池結構，其耐震強度不足之疑慮發生在空池承受地震土壓的情境。經初評篩選不符耐震要求之池狀結構，均建議再進一步詳細評估。其餘之水池結構則均符合耐震檢核之需求。相關加壓站等如須進一步詳評及補強之結構物，已另案辦理後續作業。

(四)供水管線耐震評估與運用探討

北水處雖然自民國 87 年起全面採用不銹鋼管材作為外線給水管，為提升耐震性能，施工規定必須以防震 3 彎頭方式施工。另於民國 98 年進一步參採日本 JWWA 訂定波狀不銹鋼管材料規範，採用大量採購方式，加上市場競爭機制，顯示波狀管成本已較傳統不銹鋼管施工方式成本低。基此，給水管彎接部分北水處已全面推廣採用波狀不銹鋼管，不但可提升施工效率、增加管線

耐震性。另在配水管部分，大型波狀管已於 99 年 1 月 29 日辦理擴大試用採購，其主要可用於施工遇障礙物，施工空間有限處、管線連絡高程落差或水平位移較大處、配合衛工處遷移管線及消防栓移至人行道，管線由側溝底下穿越時使用。財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心，近年來亦針對自來水管線與系統耐震研究。有關自來水系統災損推估、管網分析、設施耐震評估、管材耐震試驗、防災應變資訊系統、相關災害潛勢分析等，亦多有著墨。另 NS、S (S II) 型接頭延性鑄鐵管之容許撓曲角均足以承擔土壤液化引致的震陷。對身處地震帶的臺灣及位於臺北軟弱地層的北水處，亦藉由試辦推廣確保管線長期防漏、防震功能，將現行柔性接頭 DIP 提升至耐震接頭 DIP，仍應是更佳方案之一。

為防範大規模地震對轄區內輸配水管線系統的威脅，主要輸水幹管已採二元系統，確保震後輸水機能正常；但如局部配水管線損害仍會影響全面恢復供水的時間。因此，分年分期以較耐震的 NS 管汰換既有的老舊配水管線有其必要性。為有效運用有限的管線汰換經費，以供水小區為單元，綜合考慮地震災害潛勢、管線易損性和管線汰換效益等三項指標，進行既有配水管線汰換的優選排序參考。地震災害潛勢主要考慮個別供水小區之土壤液化災害潛勢和地震動場址效應，分別以液化臨界加速度值和場址效應修正係數描述之。管線易損性主要衡量個別供水小區內既有配水管線的耐震能力，以管線耐震化率和 10 年內管線汰換率計算

之。考慮管線汰換效益之目的，在確保震後能維持供水給較多的用戶數，故以個別供水小區內的用戶數為評估的依據。前述三項指標分別以 0 至 1 間正規化的分數來量化其大小，並以三項指標的加權平均值，作為個別供水小區汰換配水管線之優選排序的依據，示如圖 6。經探討各項指標之權重設定的合理性、供水小區汰換優選排序的效益^[8]，將 800 多個供水小區單元之汰換排序綜合名次分布（名次越小者分數越高）；另幹管部分亦持續進行更詳細評估與檢視，以供後續減災與整備運用。

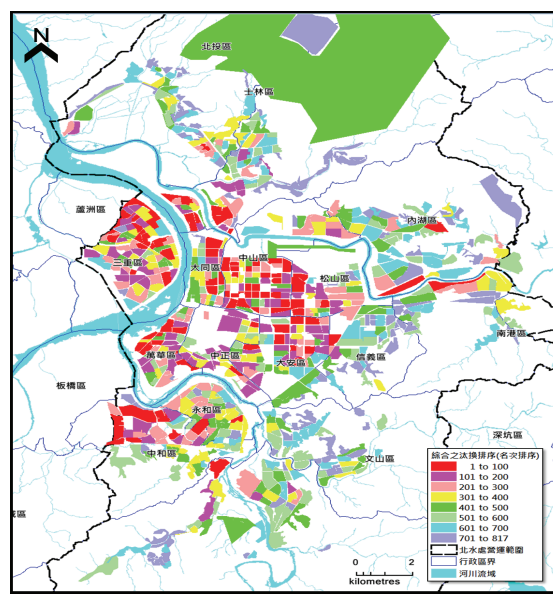


圖 6 供水小區管汰綜評分分布示意圖

四、防災應變與風險管理整備探討

(一)天然災害防災應變與風險管理整備探討

氣候變遷席捲全球，洪水、暴雨、乾旱越來越頻繁，連帶衝擊供水穩定，肩負大台北 390 餘萬人用水大任的臺北自來水事業處，以備援備載、漏水防治、防災應變 3 大措施，持續在極端氣候中，追求大台北地區

穩定供水，北水處長年送出的家庭用水濁度都落在 0.1 度以下，遠優於國家標準。然因「單一水源」是供水潛在風險。特別是近年氣候變遷衝擊且地震頻繁，造成每逢颱風、豪大雨過後，原水濁度因而飆高，造成淨水場處理困難，直接影響供水的穩定。2015 年蘇迪勒颱風的短時間強降雨，不僅造成原水濁度最高升至 3.9 萬度，更創下連續 12 小時超過 1.2 萬度的紀錄，隨著近年氣候變遷加劇，未來類似事件可能會更加頻繁。

供水備援、備載計畫也是進一步穩定供水與減災整備的重要措施，由於翡翠水庫集水區保護工作落實，就算暴雨來襲，北勢溪原水品質仍相對穩定、濁度低，有助於淨水場的處理操作。於原水濁度飆高時，如能專管取用濁度低的北勢溪原水，將其送到直潭淨水場，將爭取淨水處理時效。基此，翡翠原水管就是新店溪原水不能取用時的備援計畫之一，在翡翠水庫下游不遠處的北勢溪建造取水專管。從 106 年開始推動，並於去年 7 月開工，翡翠原水管全長約 2.8 公里，配合採用 NATM 工法進行機械鑽掘，採馬蹄型斷面，隧道淨寬 4.5m，淨高 4.5m，剖面積約 30 平方公尺^[9]。原水管隧道穿過山壁後，連接台電粗坑頭水路，並全程採重力流。預計 2023 年完工後，每日可取水 270 萬噸。

另自 95 年起次第已完成主要備援備載建設計畫包括第二條原水送水管線、第二條清水送水管線信義支線及民生內湖線、直潭第六座淨水處理設備及強化管網系統等工程，將可有效提升區域供水系統之備載及備援能力，提升對於區域內各種突發狀況之因

應能力。目前北水處轄下有 11 個供水分區，每個供水分區都有 2 條供水幹管，就是為了在天災人禍時，能及時啟動備援設備。過去就曾 2 次因道路施工意外導致重大幹管破裂而搶修困難，被迫停水搶修時，卻仍可維持用戶正常供水，不影響民眾生活，這就是備援功能的最佳詮釋，再加上翡翠原水管計畫，目前北水處的清水與原水幹管的備援率已達到 100%。

備載計畫則是提升淨水場的最大淨水量，當原水濁度暴升、用水需求遽增或設備維修時，淨水場的備用處理容量能夠維持民眾基本用水需求。目前北水處轄下的直潭淨水場、長興淨水場、公館淨水場、陽明淨水場與雙溪淨水場的總淨水處理能力為每日 454 萬噸，而備載計畫最大日供水量可達 325 萬噸，如此換算下來，備載率約為 40%，若以去年的平均每日最大供水量 268 萬噸計算，大台北地區的用水備載率已經高達 69.4%，有效降低單一水源超載的風險^[10]。

防災應變措施是穩定供水的相當重要的一環，除緊急應變機制與模擬演練外，目前轄區內另已設置 73 口防災地下水井、45 處維生取水站，更於 124 所學校設置緊急供水站，當天災來襲、供水不穩時，可透過這些設施，提供大台北地區每人、每日基本用水 3 公升至少 14 天。北水處秉持著與水共存的原則，扎實穩健地建設供水設備，即使存在單一水源高風險，仍致力穩定大台北地區的供水，甚至進一步支援新北更多地區的用水，讓民眾日常用水無後顧之憂。

(二)疫災應變與減災整備探討

依災害防救法天然災害包含風災、水災、震災（含土壤液化）、旱災、寒害、土石流災害、火山災害等。另疫災則歸為另一類，亦包含諸如：火災、爆炸等災害；統計上，傳染性疾病是造成全世界死亡人數最多的病因之一。另全球氣候變遷改變傳染性疾病的傳染途徑與分布的區域；病毒與致病性微生物不斷適應、變異，使得各種新興傳染病不斷發生。

衛生福利部疾病管制署係依據嚴重特殊傳染性肺炎疫情，訂定有關因應整備應變計畫^[11]，將防治作為區分為「整備」與「應變」兩階段：

- 1.第一階段「整備」：當鄰近國家出現疑似嚴重特殊傳染性肺炎疫情，但無持續性社區傳播，則進行各項整備工作。
- 2.第二階段「應變」：倘當地疫情持續擴大，則依照疫情狀況及風險區分為四個應變等級，啟動相對應之指揮體系與應變策略以作為應變。

面對疫情對產業的衝擊，相關政府機關與公營事業等亦必須具備「緊急應變」能力，才能邁向永續經營。國內未來如疫情風險增加，開始發生社區傳播時，企業要面對的風險及要因應的衝擊，則會有程度上的差異；可藉由疫情持續營運指引，以為因應。另透過檢視緊急應變計畫（BCP），及事件發生時應變的執行力，可評估一個事業體的緊急應變計畫是否完善及應變力強弱。

臺北市地處交通要塞，增加了傳染病發生的機會，如何有效及時因應，為重要課題之一。臺北地區雖然於 108 年 8 月修訂「臺

北市政府新興傳染病應變整備計畫」^[12]，以為防範新興傳染病傳播。惟防止新冠肺炎等新傳染病疫情蔓延及發生，各相關機關單位亦即時制定或修訂因應武漢肺炎防疫標準作業程序，另北市府除超前部署外，柯市長亦配合中央流行疫情指揮中心提升至一級同步開設主持應變，並賴相關各方人員持續共同努力與設施整備，以為因應與提升成效。

近期新冠肺炎疫情日趨嚴峻，北水處為因應新冠肺炎疫情日益嚴峻，首先已自 109 年 1 月 31 日凌晨起將出水餘氯調整應變，維持在 0.60~0.72 mg/L(飲用水水質標準 0.2~1.0 mg/L)，以確保民眾用水安全。此外，推動相關減災措施如下：首先比較 109 年 2 至 3 月計費水量與 108 年同期，除家庭用水及其他用水增加外，其餘各類別用水均減少。依用水別：家庭用水、營業用水、機關用水、學校用水、市政用水、其他用水等，增減比例依序分別為：3.83%、-4.65%、-3.91%、-15.21%、-5.16%、5.05%。此外，具指標性用戶透過智慧水表觀察 3 月用水量(1 至 29 日)，各行業別用水量平均減少 1 至 5 成。依其行業別：酒店旅館業、餐飲業、水療健身、百貨量販業、醫療院所等，增減比例依序分別為：-30.43%、-57.20%、-23.64%、-12.77%、-11.81%。其次規劃提供水費折扣方式如下：

- 1.北水處轄區之營業用戶(臺北市 12 萬餘戶、新北市約 5 萬戶)用水費減收 15%，每月減收水費約 1,900 多萬元；溫泉戶 49 戶，每月減收溫泉使用費約 47 萬元。
- 2.轄區內防疫醫院、採檢院所以及防疫旅館，比照市政公共用水優待，給予用水費

減半優惠；預估每月減收水費共 660 萬元。

3. 上述用水費優惠自 3 月起全面實施，用戶不需申請，減價水費將從 5 月份起於水費單顯示。
4. 實施期間配合疫情及北市府政策滾動式調整。

另外有關直飲台管理維護方面，亦配合調整於 109 年 3 月 20 日起暫停轄區直飲台使用，並同步關閉直飲地圖網頁，合計停用本市直飲台 612 座及新北市 31 座共 643 座直飲台；後續配合疫情趨緩後重新啟用。

北水處陸續配合政府訂定相關注意事項，諸如：

1. 所屬各單位比照市政大樓，人員進入各辦公場所除量體溫外，皆須配戴口罩方可進入。
2. 除於外網公告「均需戴口罩」措施外，各單位應事先通知來往廠商預留進出時間。
3. 自即日起所有會議與訓練改由視訊或線上方式辦理，並暫緩辦理活動，以減少群聚現象。
4. 預先模擬異地辦公及同仁遭隔離情境，確保業務仍可正常推動等。

五、結語

從民國 88 年 921 地震起，乃至於 104 年的蘇迪勒颱風，以及近年來的台南、花蓮大地震等，讓我們重新思考如何降低供水風險，並全面檢討供水系統減災與整備。當發現機能狀態低於基準值或趨近使用限界水準時，即需採取相關延壽或更新等措施來進行機能保全。在執行自來水系統整備時，亦需進行擬定各系統之需求基準，如發現有能

量不足，將編擬可行之擴建方案，並編列擴建預算及期程。其次於執行整備工作評估方面，整備計畫自 109 年起訂定 15 年為計畫期程，投入 180 億元。配合兩大主軸之決策評估，主要包含：場站設施與輸配水幹管整備評估。並透過 PDCA 循環管理的概念，於每 5 年進行一次檢討，整備工作應長期持續進行。以達到穩定供水、管理優化及防災強化等三大目標，並期達成韌性供水，永續宜居的城市。

在氣候變遷災害頻繁，供水備援、備載計畫是進一步穩定供水與減災整備的重要措施。惟防災應變措施配合緊急應變機制與模擬演練，也是應考量整備穩定供水的一環。然而，在防範天然災害之餘，從去年底新傳染病-新冠肺炎疫情蔓延至今，目前我國相關疫情應變處理相較於其他國家成效較優，惟仍希望各級應變中心與國人能在災害過程的危機處理機制中，藉由以往正確的「風險評估」與建立「風險整備與應變」的概念，深植社會人心，做好相關防疫與應變措施，並透過知識管理，將重要資訊的彙整、應用，累積經驗記取教訓，促使社會持續共同學習成長，以期得到更好的防治效果。

參考文獻

1. 謝龍生等，「精進防災科技減少災害衝擊」，第十次全國科學技術會議，社團法人臺灣災害管理學會電子報第26期，2016年,11月,15日。
2. 蔡致仁，「世界銀行研究顯示台土地人口曝災世界首位」，中國時報，2017年,9月,17日。
3. 劉家堯、吳陽龍、鄭錦澤，自來水設施操作維護指南第一篇總論，中華民國自來水協會，P1-9

~P1-31，98年(2009),12月。

4. Rajani, B., and Kleiner, Y. "Non- Destructive Inspection Techniques to Determine Structural Distress Indicators in Water Mains." Evaluation and Control of Water Loss in Urban Water Networks, Valencia, Spain, 1-20，2004。
5. 美國環保署, Water Research Foundation, Best Practices Manual for Prestressed Concrete Pipe Condition Assessment: What Works? Doesn't? What Next? 2012。
6. 環興科技股份有限公司, 「臺北區自來水第五期建設給水工程計畫第二階段後續發展第二階段報告書」第一章緒論, P1-3~P1-6, 第六章設施整備檢討分析及分期計畫, P-102~P6-106, 臺北自來水事業處工程總隊, 108年12月。
7. 國家地震工程研究中心, 劉季宇等, 「自來水管橋、藥槽及配水池之耐震評估研究案」, P104~P106, 臺北自來水事業處, 103年12月。
8. 國家地震工程研究中心, 「建置配水管網地震損害風險地圖」, 第四章供水小區耐震管線, P4-1~P4-14, 臺北自來水事業處, 108年5月28日。
9. 宋煥文等、鄧森隆、江奕廷、王瀛恭、李怡德等, 「翡翠原水管工程之設計理念」, A2, P1~P11, 第36屆自來水研究發表會, 108年11月。
10. 范煥英、張語羚等, 「啟動城市固水力追求大台北穩定供水」, 台北畫刊626期, 109年3月。
11. 「因應嚴重特殊傳染性肺炎疫情整備應變計畫」, 衛生福利部疾病管制署, 109年2月28日。
12. 「臺北市政府108年新興傳染病應變整備計畫」, 臺北市政府衛生局, 108年8月。

作者簡介

鄭錦澤先生

現職：臺北自來水事業處工程總隊副總工程司

專長：供水調度及管理、淨水處理、技術研發、工程規劃與管理、營業管理、圖資應用、採購稽核

范煥英先生

現職：臺北自來水事業處工程總隊總隊長

專長：工程綜合管理、供水調度及管理、淨水處理、營業管理、資訊處理

旱災應變作為之省思-以台水公司 2020 年抗旱為例

文/陳信利、林清鑫、李嘉榮

一、前言

台灣每年平均降雨量約 2,500 公釐，為世界平均值 2.5 倍，惟 2005 年 ESI(Environment Sustainable Index)評比台灣為全球 146 個地區中第 18 位缺水地區。另加上台灣降雨量集中於豐水期，豐枯水期降雨量差異懸殊，及河川流路短促、坡陡流急，使得水資源不易留存利用，現況水資源利用僅約年均降雨量 20%，故若未持續執行水資源基礎建設改善，台灣將面臨更為頻繁及劇烈的枯旱影響。

國家災害防救科技中心採用聯合國氣候變遷專門委員會公布之第 5 次評估報告氣候變遷情境，進行降雨量推估作業結果，我國 2021 至 2040 年枯水期雨量相較於 1980 至 2005 年平均值，將減少 9%至 14%，顯示我國因氣候變遷影響，將導致乾旱缺水風險升高。經檢視台灣歷年以 2015 年實施之抗旱限水時間最長，影響地區也最廣，當時新北、桃園及新竹（湖口及新豐）部分地區實施長達 27 天的供五天停二天分區全區定時限水措施，而台南及高雄地區亦已擬定預備實施第三階段分區限水措施，因 5 月上旬間歇性降雨而延後實施，直至 6 月上旬降下豪大雨後全面解除旱象；本(2020)年度上半年期間各地降雨量及水庫蓄水量均屢創新低，但是僅台南及高雄實施 15 天第一階段夜間減壓限水措施，其餘地區均正常供水，並充分供應枯旱期間防疫之用水，期間台灣自來水股份有限公司(以下簡稱台水公司)與經濟部水

利署各召開 10 次水情檢討會，經濟部亦召開 2 次旱災應變會議，對各地水情嚴密管控，並要求各地農田水利會及科學園區、產業園區及縣市政府加強節約用水，終至 5 月 22 日豪雨來臨解除旱象。

二、近年旱災執行限制供水狀況

(一)2015 年旱災供水狀況

- 1.台灣地區 2014 年降雨量 1643.3 公釐，約為年平均降雨量 2/3，加上 2015 年春季降雨又不如預期，故自 2014 年 11 月 27 日起陸續對新北、桃園、新竹、苗栗、台中、彰化、雲林、嘉義、台南及高雄等 10 個地區實施各階段不同程度的限水措施，第一期稻作停灌休耕面積達 4 萬 3,659 公頃，統計截至 2015 年 6 月 7 日為止，影響戶數約 499 萬戶，影響 1,397 萬人，實施長達 193 天限水措施(詳如表 1)。
- 2.台水公司為因應當時台灣西半部地區整體水情持續不佳，持續辦理跨區域支援調配，例如從板新地區購入臺北自來水事業處(下簡稱北水處)清水最高時逾 30 萬 CMD(2015 年平均購水量約 9,101 萬立方公尺)、桃園地區支援新竹供水水量約 6 萬 CMD、雲林支援彰化供水水量達 1.5 萬 CMD、嘉義支援台南供水水量 1 萬 CMD，以及高雄支援台南供水水量約 3 萬 CMD 等調度措施，並自 2014 年 11 月 14 日於官網成立抗旱專區及同步成立旱災災害緊急應變小組等應變措施。



表 1 台水公司限水地區配合各階段限水實施期程表

限水地區	第一階段限水	第二階段限水	第三階段限水
新北市板新地區	2014/12/8~2015/2/25 2015/5/22~2015/6/7	2015/2/26~2015/4/7 2015/5/12~2015/5/21	2015/4/8~2015/5/5 分區輪流供水
桃園	2014/11/27~2015/2/25 2015/5/22~2015/6/7	2015/2/26~2015/4/7 2015/5/12~2015/5/21	2015/4/8~2015/5/5 全區定時停止供水
新竹	2014/12/1~2015/2/26	2015/2/26~2015/5/21	—
苗栗	2014/12/1~2015/2/25 2015/5/22~2015/6/7	2015/2/26~2015/5/21	—
台中(含北彰化)	2014/12/1~2015/2/25 2015/5/22~2015/6/7	2015/2/26~2015/5/21	—
南彰化	2015/2/26~2015/5/21	—	—
雲林	2015/2/26~2015/5/21	—	—
嘉義	2015/2/26~2015/6/7	—	—
台南	2014/12/1~104/2/25 2015/5/25~104/6/7	2015/2/26~2015/5/24	—
高雄	2014/12/8~104/2/25	2015/2/26~2015/5/24	—

3.高雄地區原於 2015 年 4 月下旬已著手研擬預備實施停二供五第三階段限水措施，所幸 5 月 4 日起高屏流域集水區偶有午後雷陣雨挹注川流，而截至 5 月 24 日因受惠梅雨鋒面有效降雨，初步解除第二階段限水措施，後續反因高屏溪集水區降雨充沛，河川逕流量由 2015 年 4 月 22 日最低 8.0CMS 急速上升至 4,359CMS，故宣布高雄地區全面解除限水措施(台南地區延後至 6 月 7 日水情燈號方轉換為藍燈)。

4.實施大範圍之區域限制供水過程所發現的供水瓶頸管段，除非無法透過工程硬體設備改善，否則於旱象解除後應檢討以工程方式一勞永逸解決為優先考量，例如桃園蘆竹地區往往在復水時需要更長時間完

成，故後續台水公司沿桃林鐵路(萬壽路至蘆竹南山路)埋設長達 10 公里之 1000mm 口徑專用送水管改善蘆竹區南崁一帶供水，有效縮短停水後復水時間；另桃園市復興區、澤仁里及三民里等高地區往年用水來源係取自山泉水，於枯旱致水源短缺則有缺水情形發生，後經規劃埋設自來水管線及分段加壓設施供應後，已解除當地水源短缺問題。

5.經統計 2014 年 11 月 27 日至 2015 年 6 月 7 日止，旱災期間各地區實施各階段限水措施，合計總節省水量為 7,352 萬噸，而載水車至指定地點載水統計共 3,045 車次，總計載水 7 萬 5,589 噸(含非工業用水 2,550 噸)。

(二)2020 年旱災供水狀況

- 1.板新地區以優先利用三峽河及鳶山堰側流，搭配北水處支援每日 72 萬噸以上，不足部分再由石門水庫供應，若三峽河及鳶山堰側流量還有剩餘則南送支援桃園；石門水庫公共給水視水情狀況管控每日 139 萬噸降至 123 萬噸，並逐月控管水庫有效蓄水容量總量方式滾動調整因應。
- 2.新竹地區需水量約 54 萬 CMD，主要藉由頭前溪隆恩堰取用地面水因應，並從石門水庫及永和山水庫可支援最大水量 14 萬 CMD 外，不足部分藉由寶山及寶二水庫出水補足。本年 3 月份時期隆恩堰地面水最低取水量甚至僅剩約 3 萬 CMD，原水量捉襟見肘，所幸配合北區水資源局 17 口備援水井全載啟動抽水挹注 3 萬 CMD 水量而稍有紓解。
- 3.台中地區由豐原廠每日出水量大於 90 萬噸，不足水量再由鯉魚潭水庫供應且小於 62 萬噸管控，而對農業用水則以每 15 天分上、下灌區滾動檢討管控量方式因應。
4. 彰雲投地區除因 4 月份配合仁義潭水庫下游邊坡培厚工程施工，水位需降至 EL95.5m 以下，由蘭潭及仁義潭聯合運用以較高之出水 16 萬 CMD 控管外，搭配湖山水庫出水 23 萬 CMD 至 20 萬 CMD 之間管控(含支援彰化、嘉義及測試支援台南地區)。
- 5.台南地區於 2020 年旱災期間持續管控曾文、烏山頭及潭頂等 3 座淨水場出水量由原先 51 萬 CMD 逐步調高至 54 萬 CMD 超量出水，不足部分藉由南化水庫出水每日 33 萬 CMD 以下方式管控；在 5 月 19 日南化水庫有效蓄水容量僅剩 1,196 萬噸時，已著手研擬辦理取用庫底剩餘水量方案，水情其實相當嚴峻。
- 6.高雄北送支援台南於 2019 年年底方突破 5 萬 CMD 支援水量門檻，在 2020 年初運用阿公店水庫出水量每日 2 萬至 8 萬 CMD，以及坪頂淨水場增量出水因應，支援作業於 2020 年 3 月 27 日曾達最高量 11.4 萬 CMD，後續南部地區雖於 5 月 22 日開始明顯降雨，但因原水濁度偏高且南化聯通管於 5 月 23 日晚間破管，故支援作業持續至 6 月 17 日始完全停止。
- 7.高雄地區高屏溪河川流量於進入枯水期後逐漸緩降，至 2020 年 5 月僅剩 6.1CMS 歷史新低，澄清湖水庫也來到歷史低水位(如圖 1)，經台水公司第七區處持續盤點地下水及伏流水等備援水源設施，維持 28 萬 CMD 以上出水量，並研擬完成鳳山淨水場工業清水與高屏堰原水混合測試(民生 18 萬 CMD+工業 2 萬 CMD)，於符合相關水質標準後供備援用水。
- 8.澎湖離島地區採各海水淡化廠備妥相關備品維持穩定出水，配合馬公地區水庫出水量由原先每日 3,000CMD，調整為每旬 2.6 萬噸以下管控。
- 9.農曆年後各地農業用水逐漸進入一期稻作整田期，而 2020 年 2、3 月南部春雨甚少，因此經濟部水利署旱災災害緊急應變小組決定台南和高雄地區自 4 月 1 日起調整水情燈號，由原先水情正常之藍燈，轉為水情稍緊的綠燈，以提醒民眾節約用水，亦避免發生 2015 年實施稻作停灌休耕情形。

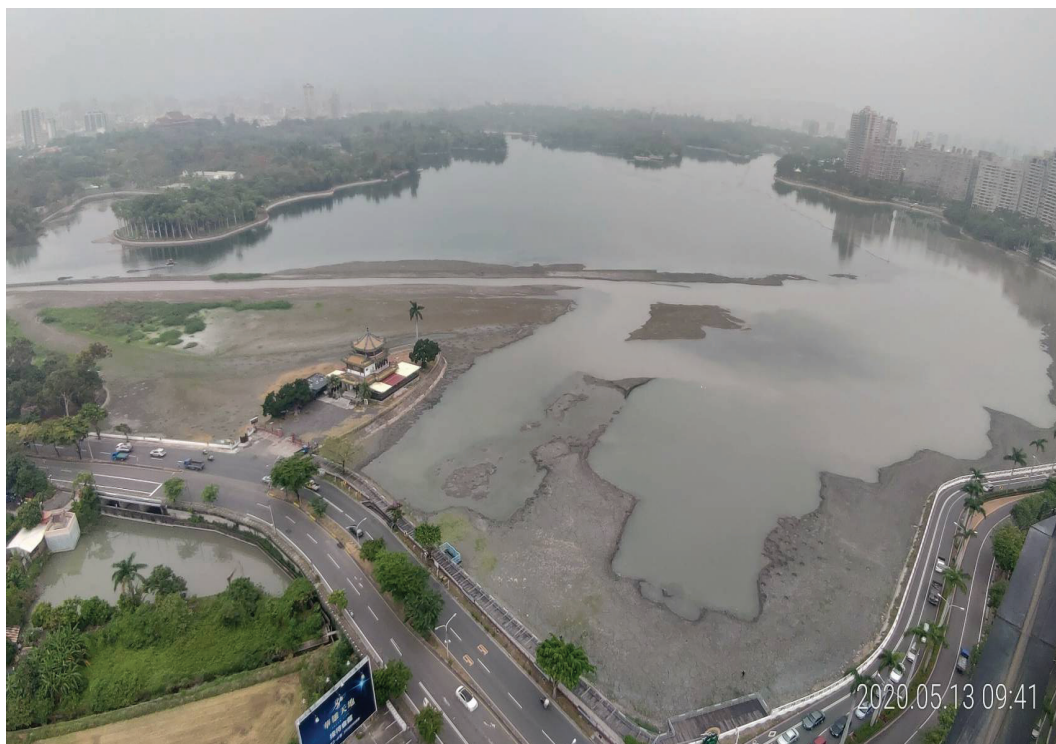


圖 1 109 年 5 月澄清湖水庫空拍照

10.台水公司自 2020 年 4 月 20 日成立旱災緊急應變小組，為預防梅雨不如預期之狀況，依據經濟部水利署水情會議決議，自 2020 年 5 月 7 日起台南及高雄地區轉換水情燈號，由水情稍緊綠燈調整為減壓供水的黃燈，在不影響民生及防疫用水下，實施離峰時段自來水減壓供水，並由政府機關及國營事業，配合實施停止噴水池、澆灌、沖洗外牆、街道及水溝等非急需或非必要用水。

11.台水公司於東港溪攔河堰之抽水量，當時在經濟部水利署南區水資源局及第七河川局努力下，2020 年從 3 月份開始引水每日 12 萬噸逐漸提升至 23 萬噸，台水公司第七區處於 4 月底再完成二座臨時土堤後，引水量達到每日 32 萬噸歷史新高，有效舒緩鳳山水庫原水透支量，是高雄地

區沒有進一步實施限水措施的關鍵之一。

12.台水公司於 2020 年持續利用枯水期加強清淤工作，就轄管之仁義潭(陸挖)、南化水庫(陸挖+抽泥)、澄清湖水庫(抽泥)、鳳山水庫(抽泥)及澎湖成功水庫(陸挖)等進行清淤工作，並於汛期期間仍就可執行範圍持續加強管控工作進度(如圖 2)。



圖 2 南化水庫 2020 年枯旱清淤施工照片

13. 本次旱災在政府相關部門於 2019 年 11 月即開始定期召開水情會議管控提前部署之下，持續推動實施跨區域原(清)水水量調度、總量管制水庫取水量、整備防災緊急、常態備援水井、加強水庫清淤工作、適時啟動伏流水、提高淨水場產水效能，以及推動科學園區及工業區自主性節水措施等，並滾動檢討維持民生及防疫用水穩定供應、工業生產不中斷與不影響農作物收成為努力方向，並以 5 月底前保留一個月民生及產業用水為目標，終於在 5 月

22 日因受梅雨鋒面及西南氣流帶來豪雨挹注全台各河川、水庫蓄水量，遂於同日撤除旱災災害緊急應變小組。

14. 經統計 2020 年台南及高雄地區水情稍緊綠燈期間維持 62 天，而公布實施夜間減壓供水 15 天期間，除台南地區因南部科學園區先進製程用水需求，用水量不減反增 12.63 萬噸外，排除此一因素台南地區共節省水量 6.37 萬噸，高雄地區節約 63.03 萬噸，合計節約 69.4 萬噸水量(詳如下表 2)。

表 2 台南及高雄地區 2015 年實施減壓供水節約水量統計表(單位：萬噸)

台水公司 109 年台南及高雄地區實施減壓供水節約水量統計表						
限水日期	供水地區實際用水量(萬 CMD)					備註
	台南地區	台南(不含南科)	節約水量(註1)	高雄地區	節約水量(註2)	
5月7日	96.33	81.75	0.37	115.11	-4.80	
5月8日	99.18	83.42	2.04	117.49	-2.42	
5月9日	96.76	81.35	-0.03	116.58	-3.33	
5月10日	94.86	79.59	-1.79	112.56	-7.35	
5月11日	96.90	81.61	0.23	115.14	-4.77	
5月12日	96.03	80.91	-0.47	113.69	-6.22	
5月13日	95.84	80.87	-0.51	117.08	-2.83	
5月14日	98.89	83.29	1.91	116.68	-3.23	
5月15日	99.08	82.97	1.59	117.00	-2.91	
5月16日	97.60	81.25	-0.13	116.61	-3.30	
5月17日	97.21	80.69	-0.69	118.17	-1.74	
5月18日	95.60	79.12	-2.26	115.65	-4.26	
5月19日	95.09	78.73	-2.65	116.72	-3.19	
5月20日	94.04	77.59	-3.79	115.24	-4.67	
5月21日	97.09	81.19	-0.19	111.90	-8.01	
節省水量		-6.37		-63.03		
節水率(註3)		-0.52%		-3.50%		

備註：

1. 台南地區(不含南科)節省水量係以 2019 年下半年該地區平均供水量 81.38 萬 CMD 為計算基礎，扣除限水期間逐日實際用水量而得。
2. 高雄地區(不含南科)節省水量係以 2019 年下半年該地區平均供水量 119.91 萬 CMD 為計算基礎，扣除限水期間逐日實際用水量而得。
3. 經統計台南地區(不含南科)及高雄地區於限水期間總計節省水量為 69.4 萬噸(6.37+63.03)，總平均每日節水率為 2.3%(69.4 萬噸/15 天/(總平均供水量 201.29 萬噸)*100%)。



三、乾旱時期停止及限制供水作業執行程序之探究

(一)為使北水處於 2002 年實施乾旱時期限水措施有所依循，經濟部訂頒「自來水停止及限制供水執行要點」，為使民眾易於瞭解政府單位在枯旱時期了解水資源供需情勢，以配合加強節約用水，於 2018 年 6 月起決定採用水情燈號來代表最新水情情況。藍燈代表水情正常、綠燈代表水情稍緊、黃燈代表已實施第一階段限水措施、橙燈代表已實施第二階段限水措施、紅燈代表已實施第三或四階段限水措施。燈號發布頻率原則以藍燈及綠燈為每月一次，黃燈、橙燈及紅燈每旬(每 10 日)一次，必要時增加頻率。

(二)水情燈號意義及對應措施(如下圖 3)：

- 1.綠燈(水情稍緊)：加強水源調度及研擬措施。
- 2.黃燈(減壓供水)：

(1)減壓供水：離峰及特定時段降低管壓供水。

(2)停止供水：停供行政機關及國營事業管轄噴水池、澆灌、沖洗外牆、街道及水溝等非急需或非必要用水。

3.橙燈(減量供水)：

(1)停止供水：試放消防栓、露天屋頂放流及其他得停供之用水。

(2)減量供水：

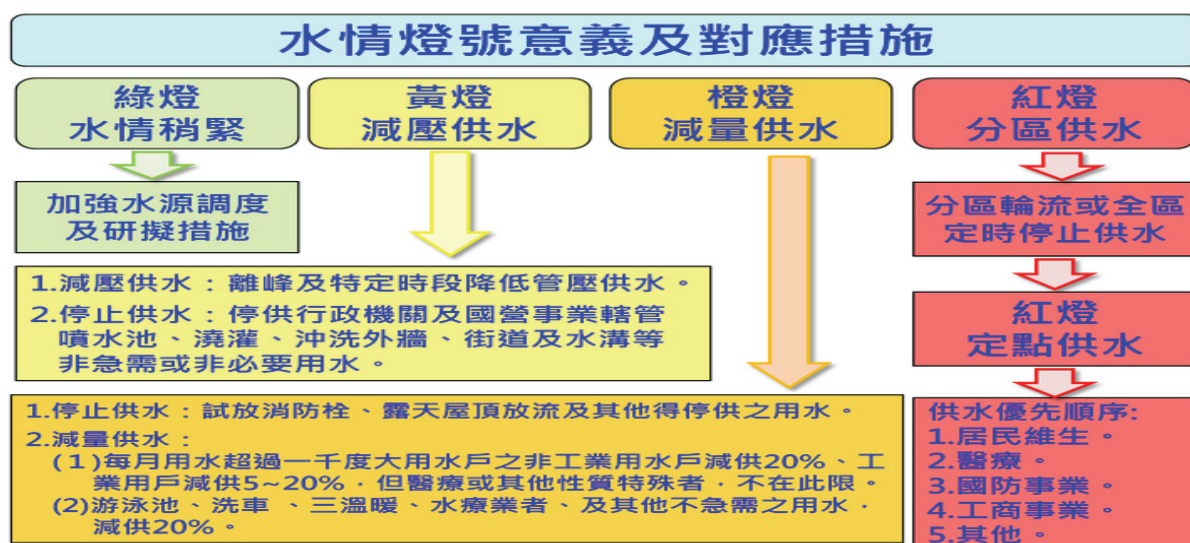
A.每月用水超過一千度大用水戶之非工業用水戶減供 20%、工業用戶減供 5~20%，但醫療或其他性質特殊者，不在此限。

B.游泳池、洗車、三溫暖、水療業者、及其他不急需之用水，減供 20%。

4.紅燈(分區供水或定點供水)：

(1)紅燈分區供水：分區輪流或全區定時停止供水。

(2)紅燈定點供水，供水優先順序如下：A.居民維生。B.醫療。C.國防事業。D.工商事業。E.其他。



107.6.21核定，於下次抗旱起適用

圖 3 水情燈號意義及對應措施圖

(三)台水公司於乾旱時期執行停止及限制供水標準與措施，大致均依據經濟部及水利署歷次抗旱及水情會議開始管控主要關鍵水庫及淨水場取(出)水量，並辦理跨區域原(清)水調度支援工作。

1.當宣布某一地區進入水情稍緊的綠燈水情燈號時，除成立旱災緊急應變小組、發布節約用水新聞稿及行文轄區行政機關及國營事業配合實施限水作業外，並應針對發布水情稍緊地區所轄之區管理處，就第一階段(黃燈)停止及限制用水時期之限水對象(如噴水池、沖洗外牆、街道與水溝、公園綠地等)，以及第二階段(橙燈)停止及限制用水時期之限水對象實施普查，並研擬實施第一、二階段限制供水執行計畫。

2.當宣布某一地區進入減壓供水的黃燈水情燈號時，水情管控會議將由原先每月召開頻率改為每二週召開一次，若為二縣市以上宣布進入黃燈水情燈號時，除配合加強水資源管控力道逐日調查節約水量成效外，另著手辦理下列事項：

(1)於官網成立「旱災專輯」。

(2)與縣市政府、消防單位、醫療單位、工廠、工業園區、衛生、環保等單位建立聯繫窗口，並規範收費規定。

(3)研擬第三、四階段(水情燈號為紅燈)限水時期之分區供水區域、輪流供水時間執行方式，以及定量定時供水執行方式計畫。

3.當宣布某一地區進入減量供水的橙燈或紅燈水情燈號時，並著手增加辦理下列事項：

(1)辦理分區或定時定量供水教育勤前訓練。

(2)邀集限水所在地區之相關政府單位研商限水措施具體內容，以降低各產業用水衝

擊。

(四)在執行第一階段(減壓供水)過程往往要求應節省 2%供水量，第二階段(減量供水)應再節省 5%供水量，第三階段(水情燈號為紅燈之分區供水)應再減少 10%部分，應有統一的衡量基準，建議統一第一階段節水量以執行前半年之供水量為比較基準，第二階段節水量以實施第一階段期間平均供水量為基準，第三階段節水量以第二階段平均供水量為基準，以檢視實施各階段限水措施之目標成果效益。

(五)在現今缺水忍受度極低的時代，「限水」一詞讓民眾直覺認為可能會因為限水而將影響日常生活，再經媒體廣泛報導催化之下，即使是會讓民眾「無感」的第一階段離峰減壓供水，亦會使得民眾及工商產業界大為緊張，因此在 2020 年抗旱過程，研擬是否加大限水力道，往往讓決策者更為嚴謹慎重，不過宣布類似「水情稍緊」這種宣示性限水措施，期程應該可以更為提前，以達預警功效。

(六)依據「自來水停止及限制供水執行要點」規定，各自來水事業應於乾旱發生時依其供水區域之用水特性及水源狀況訂定各階段限水實施內容部分，可由台水公司各區管理處分別檢討訂定並循行政程序報部備查，後續年度若有新增重大工程、用水特性或水源狀況變動再行重新修正即可，藉由即早擬訂計畫報部備查以符行政程序，並避免抗旱繁忙之際匆

促研訂而易有所缺漏。

(七)爾後執行抗旱作業可於水情燈號轉換為綠燈水情稍緊時即成立緊急應變小組，而自來水事業所屬之區管理處則可以俟轄區區域執行第一階段(黃燈)前再行成立，並依據「各類災害及緊急事件速報作業規定」定期定時執行通報作業，以穩定抗旱節奏。

(八)台水公司為國內最大的自來水供應事業機構，為私法人公司形態，對於執行用水人限制用水並無公權力，故對於實施第二階段減量供水以上之措施時，如果遇有限水用戶不願配合減量措施，只有勸導權而無實質強制執行權力，故於實施第二階段前應與相關政府單位研商，請各縣市政府協助於第二階段限水期間若有開具勸導單委婉勸阻無效之超量用戶，由地方政府派員隨同即可對不願配合之用水人，開立罰鍰處分，以強制執行限水措施。

四、省思2020年旱災應變作為

(一)中央氣象局統計自 2020 年 2 月至 4 月春季期間降雨量，為自 1947 年起有紀錄以來少雨排名第 11 名，降雨量甚至低於 2015 年。當時 2015 年抗旱時訂定高屏溪川流量若低於 8.1CMS 則實施停二供五限水措施，反之若高屏溪川流量高於 8.1CMS 則暫停實施一周，而 2020 年高屏溪川流量創歷史新低為 6.1CMS 卻仍維持各地區正常供水，抗旱歷程僅台南及高雄地區轉為減壓供水黃燈，不致發

生分區供水及稻作停灌休耕情形，由經濟部水利署、台水公司與農田水利會加強協調因應，並依降雨預報減少水庫出水量及加強引水蓄存於水庫，且農委會辦理「水資源競用區水庫灌區一期作轉旱作」作業，協調各農田水利會調配灌溉用水及採取加強灌溉管理節省水量方式，顯示政府各相關單位協力合作，實施細緻管控與應變調度措施成效顯著。

(二)有關水利署 109 年計畫推動之「防災緊急、常態備援水井建置計畫」及台水公司「常態備援水井建置」，雖非全部進入水池調配且為補充性質，但也舒緩供水量逐漸不足的窘境，在枯水期末更顯出其重要性。

(三)在 2019 年下半年底至 2020 年上半年間由嚴重急性呼吸系統症候群冠狀病毒 (SARS-CoV-2) 所引發的全球大流行疫情，被媒體形容為自第二次世界大戰以來全球面臨的最嚴峻危機，剛好此期間亦為枯水期水情較為緊張期間。行政院蘇院長也表示面對水情，政府要預作準備，做好跨區調度、水庫總量管制、自來水常態減壓、強化灌溉管理等各項措施，以達「遇枯不缺」的目標。雖然經過統計該枯旱期間自來水用量沒有明顯增加，但對後來實施夜間減壓供水的成效上或多或少有一定影響。

(四)板新地區在 2015 年上半年購入北水處清水量每日平均約 41 萬 CMD，其中以 4 月份平均將近 49 萬 CMD 最高；本(2020)年上半年統計平均每日購水量約 58 萬

CMD，其中以 3 月份平均 66.5 萬 CMD 最高(最大支援水量約 69 萬 CMD 歷史高峰)，若與 2015 年上半年比較，2020 年上半年有效減緩石門水庫超過 3,000 萬噸出水壓力，對於 2020 年 4 月 1 日僅剩 8,455 萬的石門水庫而言幫助頗大。

(五)提前部署也是讓南部地區沒有進一步實施限水措施的主要原因之一。經統計高雄北送支援台南自 2019 年 10 月開始測試提高支援水量，經多次測試建立標準作業流程，至 2020 年 5 月底為止，支援水量高達 1,710 萬立方公尺，寫下歷史新高。

(六)新竹及台南地區原水蓄存量相對其他地區低，若長時間降雨不如預期即有面臨乾旱的風險，又上述兩地區除民生用水逐步成長外，隨著科技園區及產業園區進駐用水殷切，水源來源更顯不足，故轄區內地面水源量若低於預期時應及早啟動備援水井或移用農業用水，將水量蓄存水庫並視水情滾動檢討操作，以延長待雨期。

(七)藉由工程改善供水瓶頸往往效果最為明顯。板新地區目前藉由「板新地區供水改善計畫二期工程」第二階段計畫完成，本年度將執行板新地區受北水處支援最大水量測試作業；桃園新竹地區則利用「板新大漢溪水源南調桃園地區工程計畫」搭配「桃園新竹備援管線工程」，檢討南北桃聯合操作模式後，亦將可突破桃園地區支援新竹地區最大 8 萬 CMD 的瓶頸；南部地區俟大泉淨水場於 2021 年初完工投入營運後，在安全情況

下亦應能嘗試挑戰北送最大量支援測試，後續利用「曾文水庫與南化水庫聯合運用工程」完工後，將可大大降低南部地區缺水風險。

五、檢討與建議

(一)以 2020 年抗旱應變為例，經濟部水利署於 2 月 26 日召開之第三次水情會議即決議不影響民生及防疫用水原則下，實施夜間減壓節水，於深夜 23 時至翌晨 5 時(合計 6 小時)期間藉由減少供水量及重要節點壓力的監控，實施供水壓力管控措施，惟因後續降雨仍不如預期，故於 4 月 1 日始對外正式宣告水情燈號轉換為水情稍緊的綠燈，雖在實務上宣示意義大於實質效果，但仍可作為進一步實施限水措施的前哨站，提醒民眾節約用水。

(二)目前政府透過開源、節流、調度及備援機制，有效提升大區域之供水系統耐旱能力，惟對於偏遠山區獨立供水系統，雖然戶數少卻因無其他替代水源，而需特別關注並提早實施預警，避免成為旱災災害防救破口，而抹滅整體抗旱過程相關人員付出之辛勞。

(三)自來水事業配合地層下陷防治政策停減抽用地下水，而改採湖庫水或地面川流水供應，不足水量需移用農田水利會農業用水補足因應，係國營事業配合政策之應當行為，惟地面水量不足移用農業用水之水量若係取自地下水者，則應以鄰近淨水場或水質較佳者優先適時抽取因應，以使資源運用更為有效。

(四)雖然跨區域調度水源已是常態，但災害防救期間往往是加大自來水供輸強度，又必須考量因應一手抗旱一手防澇的突發狀況(如 2020 年 5 月下旬豪雨事件)，又可能支援方變成受支援單位。這種應急調度不得不為的應變作為，潛藏著破管的風險，操作人員必須特別注意供水設備緩啟緩閉原則，搭配觀測監控數據，以降低操作風險。

(五)往往進入汛期解除旱象時，總是伴隨著劇烈的天氣變化，而衍生短時間強降雨造成原水濁度飆高，超過淨水場所能處理負荷的狀況，甚至連平常取用水庫水較無濁度問題的淨水場，也因為水庫有效蓄水容量少，水位低而受短時間大量高濁度進流而影響產水效能，故於中央氣象局發布有可預期性明顯降雨時，應採取必要預防性措施，避免原水濁度過高而停止供水。

(六)旱災不同於颱風或地震災害，屬於緩進影響之天然災害，對於各級政府及自來水事業可於超前部署開始，即著手記錄各項抗旱應變作為，藉此讓社會大眾了解政府於此抗旱過程透過開源、節流、調度及備援機制的努力，也可以喚起民眾對於節約用水的重視程度。

(七)國內各科學園區及產業園區之經濟規模龐大，水電供應非正常的波動，恐怕都會影響國內科技工業的生產營運，為免限水措施而影響國內工業之發展，應由各園區管理單位配合各階段限水措施預計節水成效，造冊列管於實施第二階段

(含)以下統一由該園區採行自主性節水方式因應，並滾動檢討定期節約水量情形。

(八)旱災期間限制供水是水量的減少，但水質應該是一樣的。但是枯旱期間取用地面水或水庫水的原水水質條件會隨著水庫有效蓄水容量或河川川流量下降而趨於惡化，也會因為實施停復水措施而增加清水水質受污染的風險，故若預計實施第三階段(水情燈號紅燈)之限水措施時，對於定時採樣檢驗臨時供水站水質及加強淨水場各處理單元水質的檢驗工作，需要將其執行方式明確納入實施計畫內，確保水質的品質。

六、結語

(一)本(2020)年抗旱採以維持各地區 5 月底保有 1 個月以上民生及產業用水為目標，經過各級政府、水庫管理單位及自來水事業的配合，順利完成一期稻作春耕插秧及民生、產業正常供水，並於國內防範 COVID-19 肺炎期間用水無虞，順利圓滿達成任務。

(二)台灣地區降雨因時空之變化分布不均，近年更有短時間強降雨天數偏少將與月份集中等趨勢，更增加枯旱的風險，為使流域內水資源能最佳利用，透過歷史水文資料進行模擬演算，作為預警與分配將更形重要，搭配相關工程資源的投入，更有利於決策者處理應變，強化抗旱強度。

(三)水資源為國家生存發展之基礎，攸關全民福祉及社經發展，提供穩定用水一直

都是政府努力的目標。面對用水成長及氣候變遷、澇旱頻率增加等日益嚴峻的環境變化，仍需政府持續積極推動開源、節流、調度及備援等各項工作，尤其是前端水資源的開發、調度及分配，以穩定國內各供水區內之用水，並達經濟、社會、環境的永續發展及對資源的永續利用。

參考文獻

- 1.王國堅、蔡檜森、林信忠，「104年台灣西部地區旱災期間自來水公司之因應作為」，中華民國自來水協會會刊，2015
- 2.經濟部，「自來水停止及限制供水執行要點」，中華民國 105 年 2 月 18 日經授水字第 10520201460號令。
- 3.經濟部水利署中文版全球資訊網，
<https://www.wra.gov.tw/>
- 4.台灣自來水股份有限公司乾旱時期停止及限制供水執行標準與措施作業要點。

作者簡介

陳信利先生

現職：台灣自來水公司供水處組長

專長：供水調配、職業安全衛生

林清鑫先生

現職：台灣自來水公司供水處處長

專長：供水實務、土木工程

李嘉榮先生

現職：台灣自來水公司副總經理

專長：自來水工程規設及營運管理、土木工程

水庫土霉味(2-MIB 及 Geosmin)之監測及探討

文/林彥宏

一、前言

台灣因全球暖化及環境污染造成水庫優養化現象，並衍生臭味問題，部分作為飲用水水源的水體中，藻類、菌類等微生物因過度增長而分泌的次生代謝產物是產生臭味的主要原因。台灣自來水公司(台水)以高階的氣相層析質譜儀(GC-MS)檢驗水中土霉味物質作為監測臭味來源的設備，分析具代表性的 2-甲基異莰醇(2-MIB)、反-1,10-二甲基-反-9-萘烷醇(Geosmin)二種物質，長期監控為自來水水質把關。依據台水公司年報顯示，水庫水佔引用水源水量半數以上，因台灣全年雨量分佈極不均勻，需透過水庫蓄存豐水期水量方能支應各種用途之用水需求。

枯水期間雨量減少，水庫因藻類滋生進而產生臭味問題。臭味對民眾來說是一種主觀感覺，縱使對人體的健康無害，但民眾會直接聯想到飲用水水質的安全性，懷疑是否遭受污染而無法安心飲用。水源之臭味種類繁多，主要可分為八類，即土霉味、氯味、草味、沼氣味、芳香味、腥臭味、藥水味及化學藥品等。對於臭味物質，在高濃度與低濃度時，會呈現不同的氣味，而且不同種類的臭味物質，也可能呈現相同的臭味。除此之外，由於地區性的差異，每座水庫臭味種類亦不相同。根據一般自來水用戶反映的臭味問題中，以氯味、腥臭味、土臭味及有機芳香物的氣味較為常見。自來水中的氯味主要來自於淨水流程中的加氯消毒程序，造成氯味的主要物質為水中的自由餘氯以及結

合餘氯。通常當水中餘氯量超過 0.15 mg/L 時，一般民眾可感受到氯味的存在。另外，腥臭味及土霉味可由藻類、水中微生物本身產出或其衍生之代謝物所造成。腥臭味的來源可能為藍綠藻類的顫藻、魚腥藻或甲藻類等，這些藻類可分離出產臭的醛類、胺類及硫類等物質。而 2-MIB 及 geosmin 則被證實是水中藍綠藻或放線菌代謝作用時所產生的物質。然而當以上各種臭味物質同時出現時並不會發生加乘作用，反而會有遮蔽現象，例如，當氯氣與土霉味物質共存時，土霉味會被覆蓋，氯味將較為顯著。

二、採樣與分析

(一)採樣地點

台水公司每季採集引用水源水庫共 29 座(如表 1)。

表 1 台水公司作為引用水源之水庫列表

地理位置	採集水庫
北區 (共 9 座)	基隆新山水庫、基隆西勢水庫、新北鳶山堰、桃園石門水庫、新竹寶山水庫、新竹寶山第二水庫、苗栗明德水庫、苗栗永和山水庫、苗栗鯉魚潭水庫
中區(共 2 座)	台中石岡壩、南投日月潭水庫
南區 (共 11 座)	雲林湖山水庫、嘉義蘭潭水庫、嘉義仁義潭水庫、台南烏山頭水庫、台南白河水庫、台南鏡面水庫、台南南化水庫、高雄阿公店水庫、高雄澄清湖水庫、高雄鳳山水庫、屏東牡丹水庫
離島(共 7 座)	綠島酬勤水庫、澎湖成功水庫、澎湖東衛水庫、澎湖興仁水庫、澎湖小池水庫、澎湖西安水庫、澎湖七美水庫
總計	29 座水源水庫

(二)土霉味物質的定性與定量分析

土霉味物質以化學分析法之固相微萃取(Solid-phase micro-extraction, SPME)進行濃縮,再配合氣相層析儀(GC-MS)進行 2-MIB 與 geosmin 之定性與定量分析。

1.固相微萃取及脫附上機分析步驟：

- (1)在氣提瓶中先加入一平匙約 2.7g 之 NaCl，再以移液管取 10mL 水樣，放入氣提瓶中。
- (2)添加內標準溶液及擬似標準溶液：各添加 $2\mu\text{L}$ 之 $50\mu\text{g/L}$ 之內標準溶液及擬似標準溶液，添加後之濃度為 10ng/L 。
- (3)將氣提瓶置放多功能自動進樣器盤上，設定進樣程序。
- (4)於 65°C 恆溫槽加熱經 60 秒鐘旋轉均勻後，插入吸附針纖維至頂部空間予以吸附，於 65°C 恆溫槽中氣提，吸附 30 分鐘。
- (5)吸附 30 分鐘後，多功能自動進樣器將吸附纖維插入氣相層析質譜儀 (GC-MS) 分析。
- (6)吸附纖維針退回，多功能自動進樣器再將吸附纖維插入淨化槽烘烤 10 分鐘，以確定可供下次分析使用。

2.氣相層析質譜儀：

使用 SIM (Selected Ion Monitoring) 進行定性及定量之質量設定如表 2，分析結果如圖 1。

表 2 使用 SIM 進行定性及定量之質量設定

化合物	滯留時間(單位：分，依實際層析圖調整設定)	主要離子 (m/z)	次要離子 (m/z)
Geosmin	15.435	112	126
2-MIB	11.174	95	107, 108

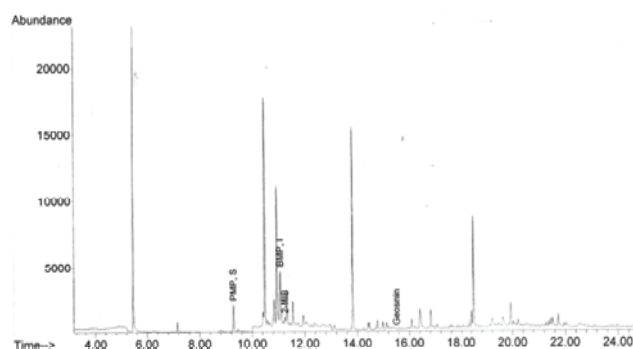


圖 1 Geosmin 及 2 - MIB Selected Ion Monitoring 層析圖

三、監測結果與分析

(一)監測結果

近 5 年(105 年-109 上半年)各水庫監測結果如圖 2~圖 30。

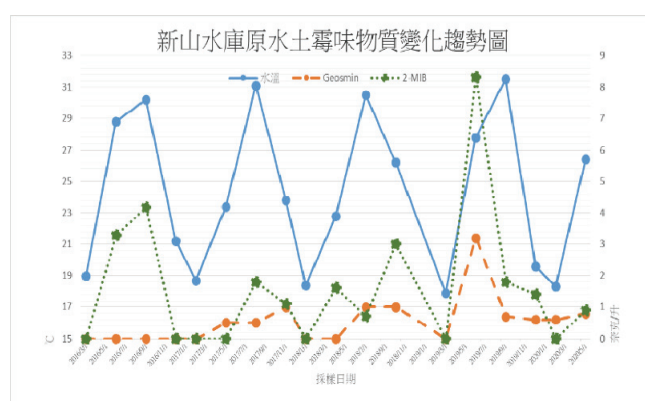


圖 2 基隆新山水庫水庫原水土霉味物質變化趨勢

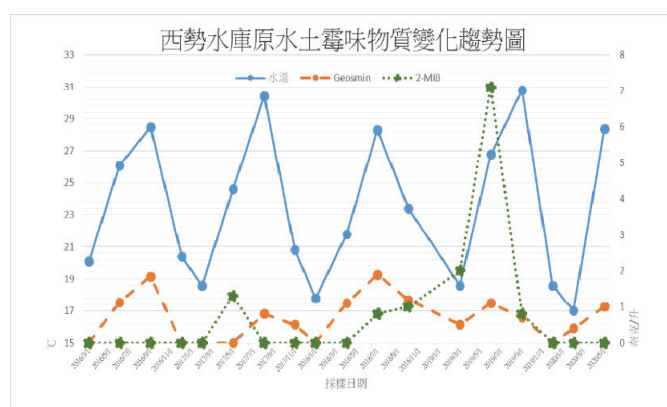


圖 3 基隆西勢水庫原水土霉味物質變化趨勢

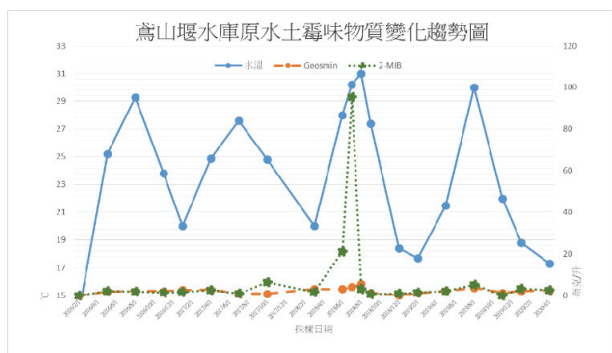


圖 4 新北鳶山堰原水土霉味物質變化趨勢

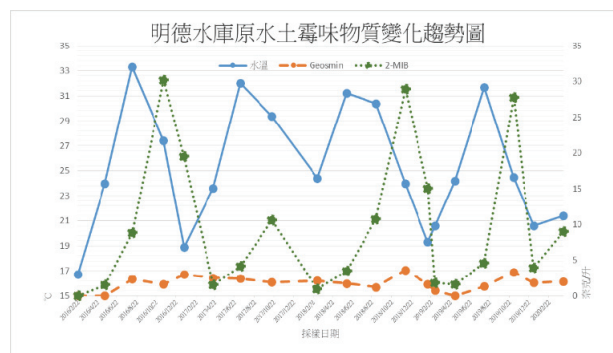


圖 8 苗栗明德水庫原水土霉味物質變化趨勢

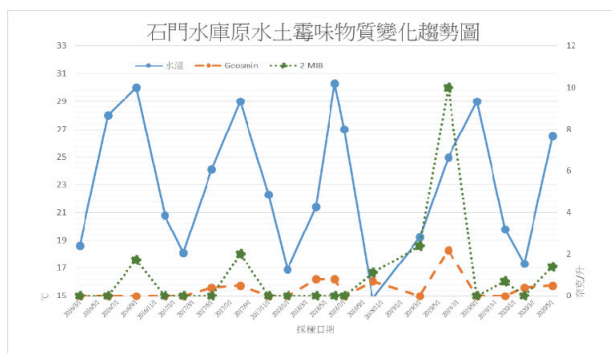


圖 5 桃園石門水庫原水土霉味物質變化趨勢

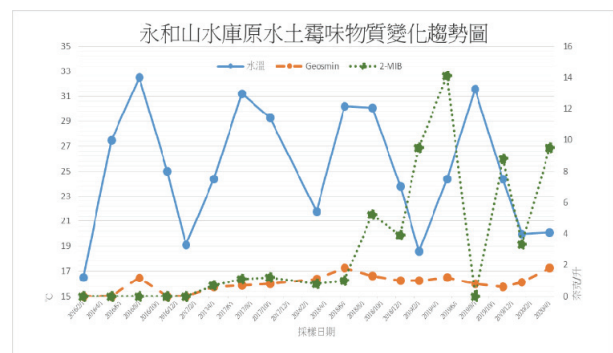


圖 9 苗栗永和山水庫原水土霉味物質變化趨勢

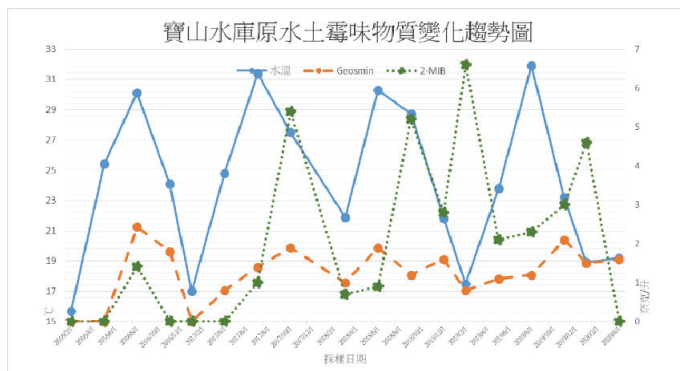


圖 6 新竹寶山水庫原水土霉味物質變化趨勢

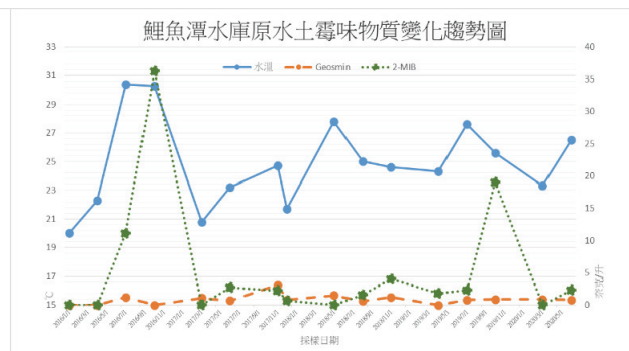


圖 10 苗栗鯉魚潭水庫原水土霉味物質變化趨勢

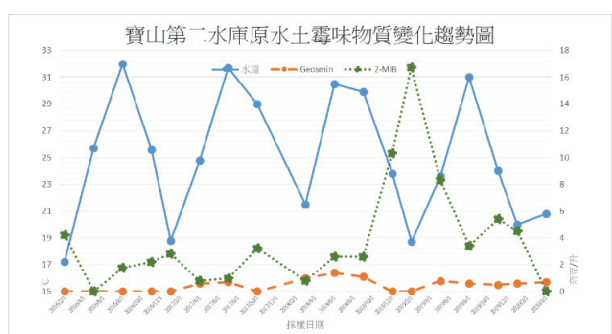


圖 7 新竹寶山第二水庫原水土霉味物質變化趨勢

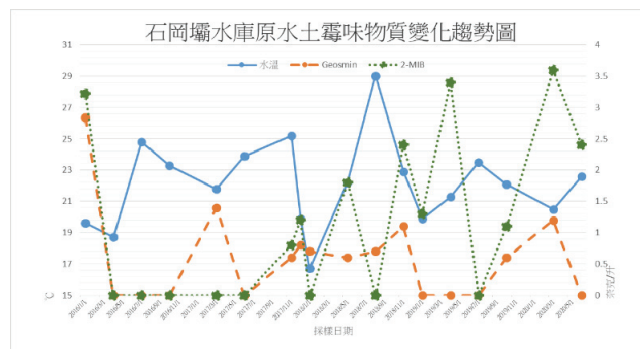


圖 11 台中石岡壩原水土霉味物質變化趨勢

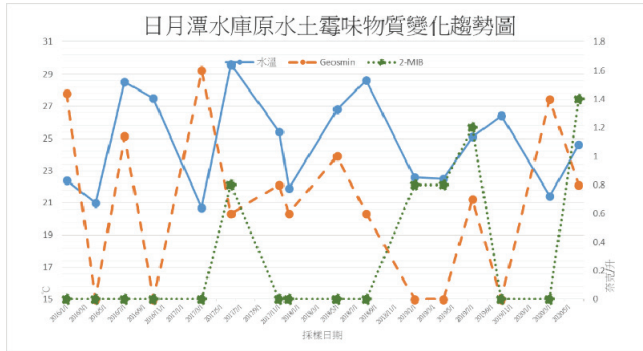


圖 12 南投日月潭水庫原水土霉味物質變化趨勢

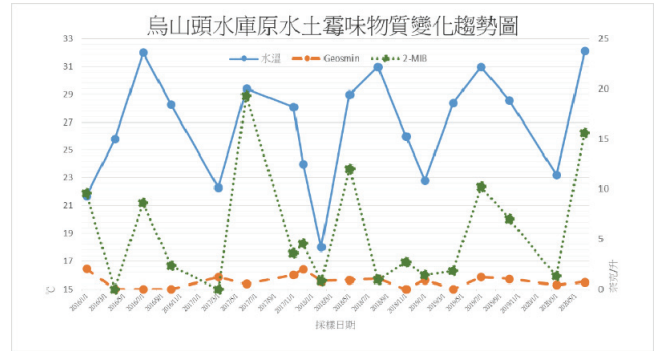


圖 16 台南烏山頭水庫原水土霉味物質變化趨勢

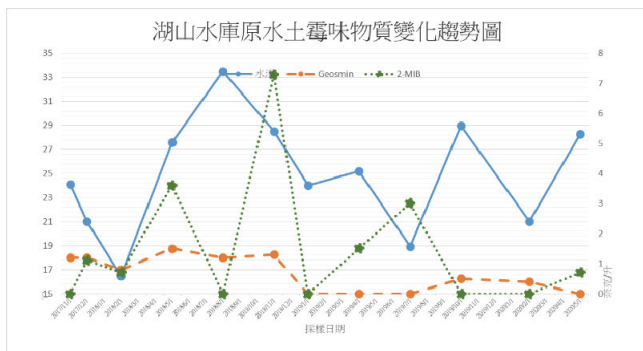


圖 13 雲林湖山水庫原水土霉味物質變化趨勢

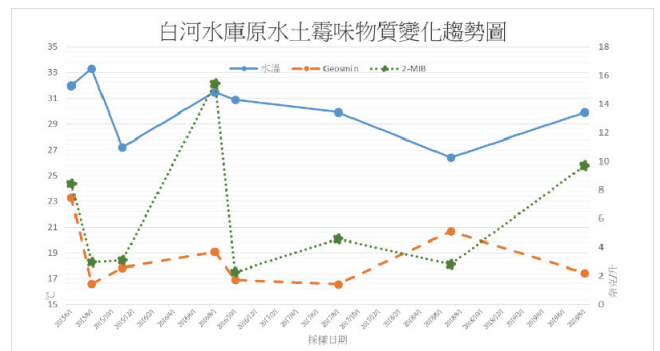


圖 17 台南白河水庫原水土霉味物質變化趨勢

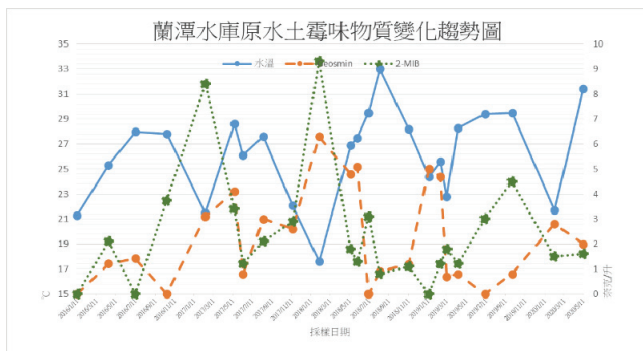


圖 14 嘉義蘭潭水庫原水土霉味物質變化趨勢

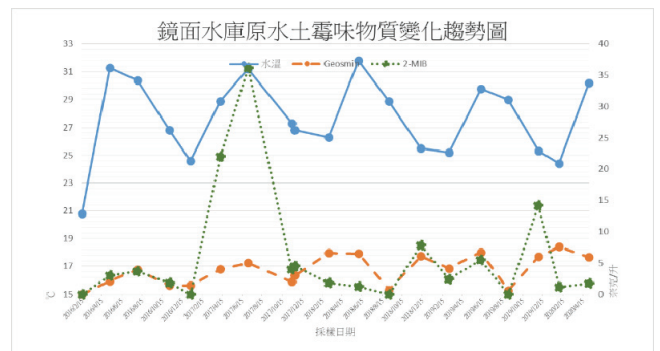


圖 18 台南鏡面水庫原水土霉味物質變化趨勢

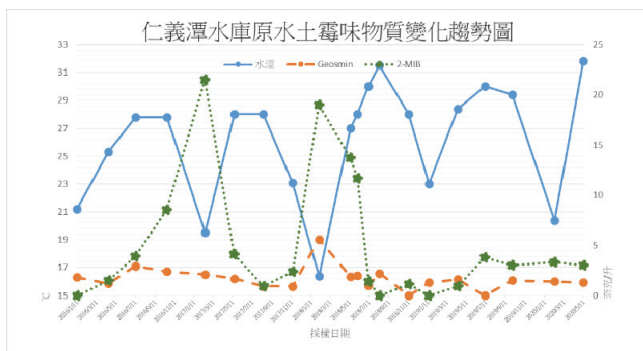


圖 15 嘉義仁義潭水庫原水土霉味物質變化趨勢

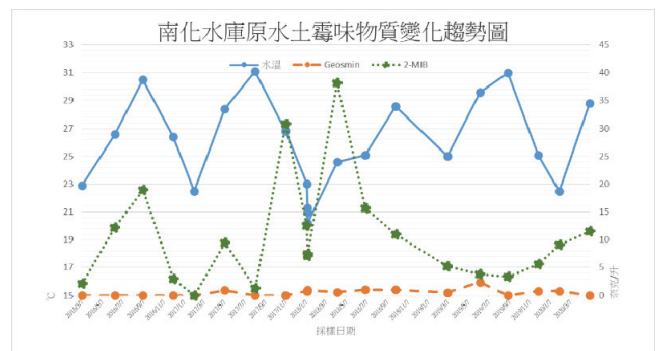


圖 19 台南南化水庫原水土霉味物質變化趨勢

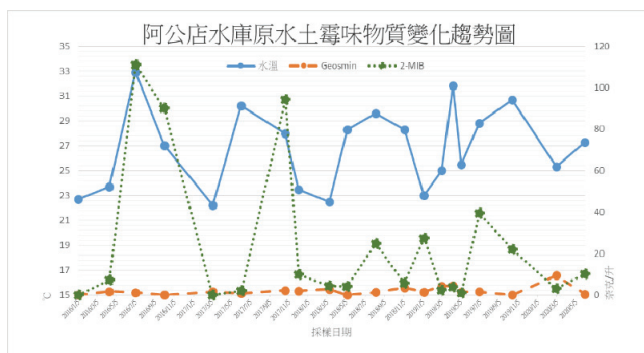


圖 20 高雄阿公店水庫原水土霉味物質變化趨勢

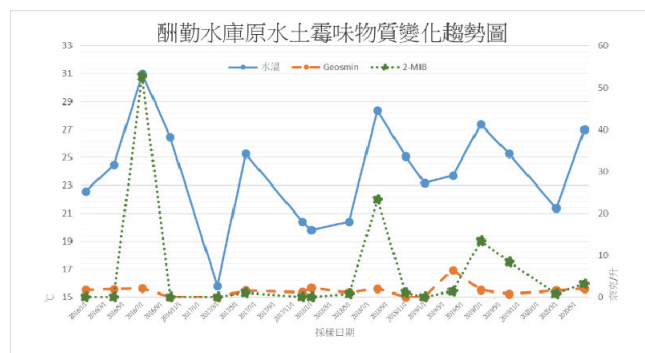


圖 24 綠島酬勤水庫原水土霉味物質變化趨勢

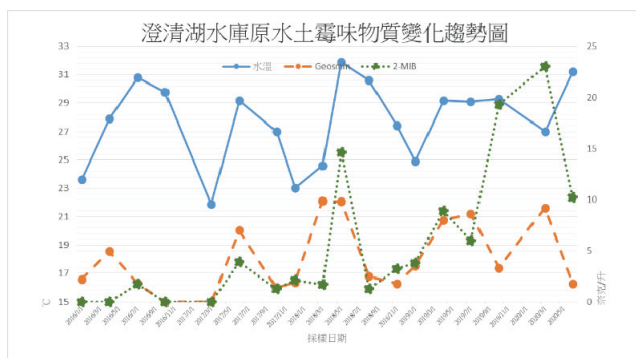


圖 21 高雄澄清湖水庫原水土霉味物質變化趨勢

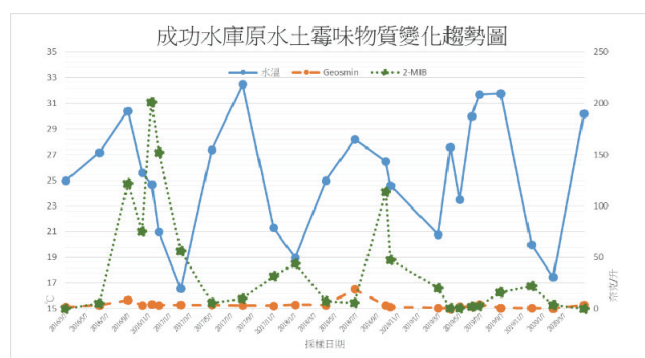


圖 25 澎湖成功水庫原水土霉味物質變化趨勢

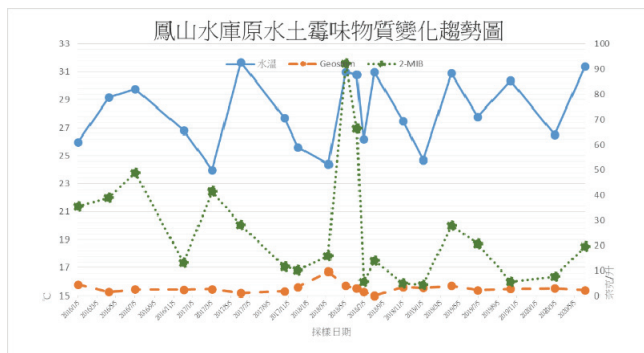


圖 22 高雄鳳山水庫原水土霉味物質變化趨勢

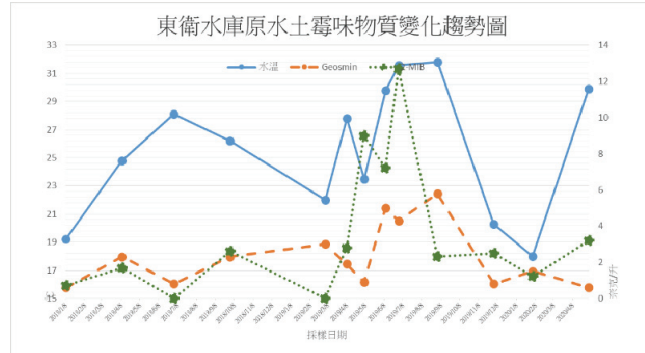


圖 26 澎湖東衛水庫原水土霉味物質變化趨勢

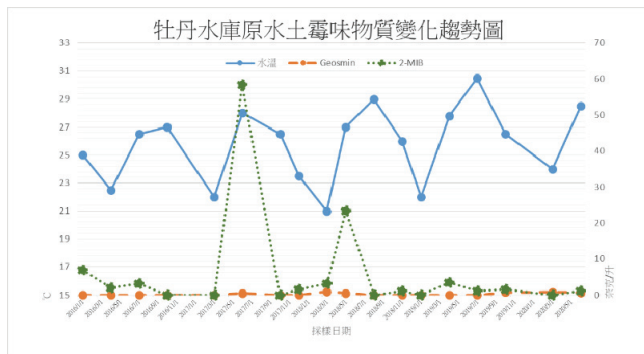


圖 23 屏東牡丹水庫原水土霉味物質變化趨勢

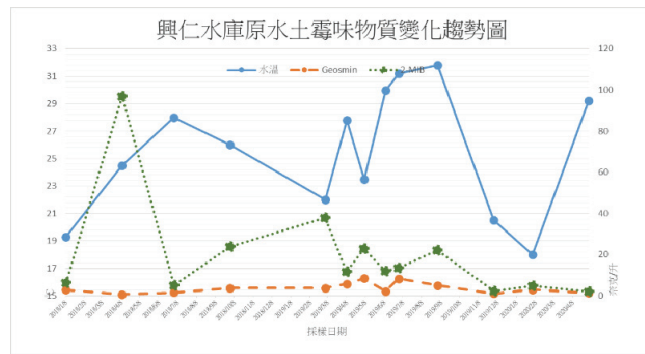


圖 27 澎湖興仁水庫原水土霉味物質變化趨勢

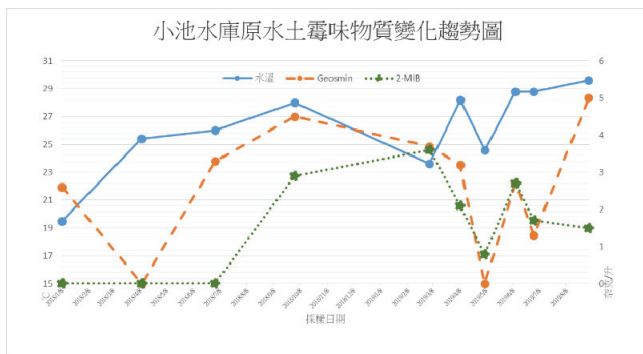


圖 28 澎湖小池水庫原水土霉味物質變化趨勢

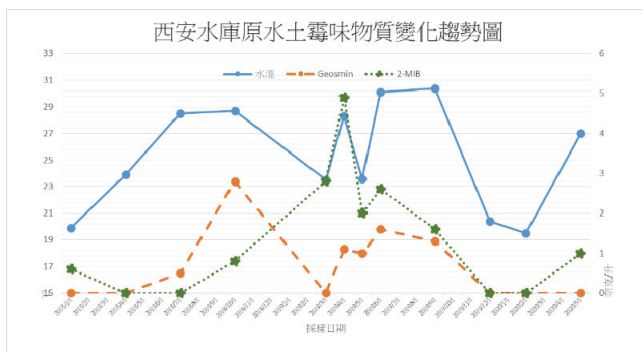


圖 29 澎湖西安水庫原水土霉味物質變化趨勢

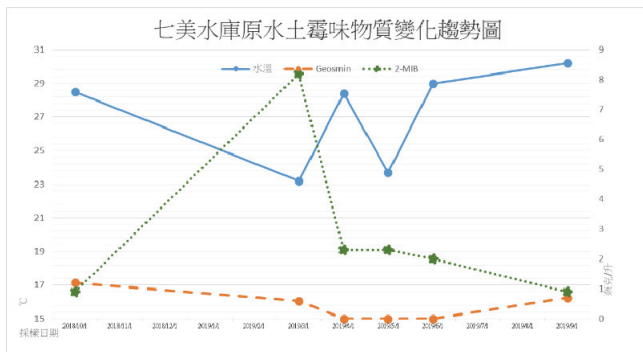


圖 30 澎湖七美水庫原水土霉味物質變化趨勢

(二)各水庫土霉味物質分析

由近五年的監測資料顯示，各水庫的土霉味物質濃度與水溫的高低呈現高度的相關性，其中 2-MIB 或 Geosmin 濃度的最高值落在該年度水溫最高溫的時期，隨著季節轉變，2-MIB 或 Geosmin 濃度即從最高峰滑落，並隨溫度下探至低點。

依據 Suffetetal.(1995)之研究，人類對

2-MIB 及 Geosmin 嗅覺之閾值分別為 29 ng/L、10 ng/L，從監測數據分析，北區鳶山堰水庫、明德水庫、鯉魚潭水庫，南區鏡面水庫、南化水庫、阿公店水庫、鳳山水庫、牡丹水庫，離島酬勤水庫、成功水庫、興仁水庫等，曾發生 2-MIB 超過閾值之情形，其中鳶山堰水庫、阿公店水庫、鳳山水庫、離島成功及興仁水庫等之 2-MIB 監測數值曾達 100 ng/L 以上，顯示當高水溫又遇到枯水期會有濃縮現象，水庫優養化亦有助長微生物釋放 2-MIB 之潛勢；另外，南區澄清湖水庫、鳳山水庫則曾有 Geosmin 超過閾值之情形，但相對上測值明顯低了許多。

從表 1 各區分別評析，中部二座水庫較為接近貧養，故發生土霉味問題之機率低；北區鳶山堰水庫、明德水庫、永和山水庫、鯉魚潭水庫等則有發生土霉味問題之潛勢，尤其明德水庫之 2-MIB 測值與水溫變化的相關性高，每年夏季溫度高於 31°C 時，測值高於閾值(29 ng/L)的發生率亦高。南區除了湖山水庫外，其餘均有發生土霉味問題之潛勢，雖然夏季高溫，然此時亦是台灣南部的雨季，所以超過閾值的情形並非每年發生，而近 3 年水質狀況相對較佳。離島水庫則以酬勤、成功、東衛及興仁水庫發生土霉味的潛勢較高，其中成功水庫因枯水季長，蓄水量經常不足，為增加水量，環境中的生活污水容易隨逕流而進入水庫，導致土霉味高於閾值的發生率較高。

四、結語

從台灣各座水庫近 5 年的監測資料來看，原水中長期存在土霉味物質屬自然現

象，然而其濃度會隨著季節溫度的變化消長，夏季即使偶爾會發生土霉味偏高情形，但並不會延續一整年。

台水公司面對土霉味問題的偶發事件，各淨水場已備有各自一套的應變機制，多數淨水場可啟動備用水源，若水量不足時亦可由其他場支援供水。即便發生 2-MIB 高於 100 ng/L 之情形，如鳶山堰水庫有 PAC 加藥設備，在原木進到板新淨水場前有足夠的時間進行吸附。路竹淨水場除裝設 PAC 加藥設備外，另設有強制曝氣設備，可促進鐵、錳的氧化，同時又可消除臭味。此外，澎湖地區的水源除了庫水，近年來持續增加海淡廠的出水量，自來水水質明顯提升，亦降低土霉味問題之疑慮。

當枯水季水庫優養化發生時期，即使水庫已產生臭味問題，民眾其實無需恐慌，台水公司依舊提供優質自來水，近 5 年自來水中土霉味物質檢驗結果，測值均低於閾值。在此感謝台水公司基層同仁的付出與辛勞，持續為國人飲用水所做的努力。

參考文獻

1. ruchet,A.,Hochereau,C.,Gogot,C.,Codiassa,D.,Taste and Odor Episodes in Drinking Waters : Solved and Unsolved Case Studies and Needs for Future Research, Proceeding of 4-th International Workshop on Dinking Water Quality Management and Treatment Technology,March 4-5,137-147,Taiwan,R.O.C.,1998.
- 2.Persson,P.E.Sensory Properties and Analysis of Two Muddy Odour Compounds, Geosmin and 2-Methylisoborneol,in Water and Fish,Water Research,14, 1113- 1118,1980.
- 3.Suffet,I.H.,Ho,J.,Chou,D.,Khiari,D.and Mallevialle,J.,Taste and Odor Observed using Drinking Water Treatment,In Advances in Taste-and-Odor Treatment and Control,Ed.by Suffet,I.H.,Mallevialle,J.,and Kawczynski,American Water Works Association,Denver, Coloroda,USA.,1995.
- 4.汪俊育，南台灣代表性水源地臭味問題之研究，國立成功大學環境工程系碩士論文，2000。
- 5.李俊德、陳是瑩、王月花、鄭明蕊、李明輝，澄清湖水 源臭味控制方法之研究，國立成功大學環境工程研究報告第45 號，1985。
- 6.林財富、張怡怡，自來水配水管網中影響感官(味覺、嗅 覺)物質之調查與改善，行政院環保署研究報告 (EPA-91-U1J1 -02-101)，2002。
- 7.林財富，108 年淨水處理-活性碳用於原木臭味處理訓練計畫講義，2019。
- 8.林亭頌，不同共代謝基質濃度對水庫中臭味物質生物降 解之影響，國立成功大學環境工程研究所碩士論文，2009。
- 9.葉宣顯、林財富、黃文鑑，水庫底層水中有機物及臭味物質應急處理技術(第一年)，2010。
- 10.劉家玲，預氯程序對粉狀活性碳吸附 2-MIB 之影響，國 立成功大學環境工程研究所碩士論文，2002。
- 11.鄭堡文，水處理以添加粉狀活性碳吸附臭味之控制-以2-MIB去除之探討，2013。

作者簡介

林彥宏先生

現職：自來水公司總管理處水質處技術士

專長：水質檢驗、水質異常研究

以 EPANET 模擬分析供水管網水質 — 以北水處內湖分區為例

文/薛志宏、張凱迪、李佳陵

摘要

本研究以免費下載 EPANET 軟體，對北水處內湖分區管網進行水質模式分析，經妥適模式校正後，模擬結果可充分掌握全區管網水齡、自由餘氯及消毒副產物三鹵甲烷時空變化與分佈，及不同水源摻合水質影響，更能應用於水質參數間相關性分析。綜整實際分析結果及文獻探討，提出自來水事業管網水質模式分析之應用方向。

關鍵字：水質模式分析、餘氯衰減、三鹵甲烷生成

一、水質模式分析目的與必要性

淨水場處理後的自來水，經由管線輸送至用戶，由於管網系統之設置、維護或操作方式，可能導致於管網中發生水質變差狀況，原因有淨水場處理不佳或出水中含有無法去除之天然有機物，於輸送過程中持續進行反應或被微生物利用、管線輸送至被用戶使用間之滯留時間過長、管網系統配水池儲存或攪拌狀況導致長的滯留時間或管材不佳導致釋出等；發生的水質狀況則有消毒副產物過度產生、自由餘氯被消耗致不足、管壁產生生物膜及微生物再生、產生臭味及管材腐蝕釋出金屬及微生物等。

AWWARF(1996 年)指出，自來水在管線系統輸送過程，會遭遇複雜的物理、化學及微生物程序，而使水質不斷產生變化，可能

與水本身或管線設備有關，故供水水質會隨管網不同地點及不同時間而改變，人工隨機採樣檢驗，僅能瞭解某一時間點(採樣時間)及某一地點(採樣代表點)之水質狀況，無法掌握供水水質的全貌，惟有透過模式分析才能達成對管網水質之全面性瞭解與掌握。

1990 年代美國環保署發展出管網模式分析軟體 EPANET，提供自來水業者或學術研究者免費下載使用，它具有管網水理分析(Hydraulic Analysis)及水質分析(Water Quality Analysis)的功能，能分析穩態(Steady-state or Single Period)及時間動態(Extended Period)狀況。模式分析的目的為利用數學方程式對實際存在管網系統狀況進行近似模擬，希進行管網實際運轉行為之瞭解與研究探討。

二、水質模式分析基本原理

進行管網分析有幾個主要步驟，包括發展基本管網模型、校正及驗證模式、建立分析目標與應用管網分析方法，最後進行分析及結果展示。基本管網模型由節點(Nodes)和連結(Links)組成，節點代表接點(Junctions)、水槽(Tanks)及水庫(Reservoirs)；連結則包括管段、幫浦、控制閥等元件。

管網水理分析運用 3 個基本觀念，分別為質量守恆、能量守恆及磨擦產生水頭損失(Headloss)等。質量守恆表示進出某一管元件

之水的質量或體積是相當的；能量守恆則表示水流動產生之動能、位差產生之位能及抽水機產生之加壓能是守恆的。其中可能因水流經管線與管壁磨擦，造成摩擦水頭損失部分能量。水損公式一般使用 Hazen-Williams 方程式。而上述觀念所產生的一些方程式則採用 Newton-Raphson 疊代法求解。

管網水質模式分析必須建立在精確的水理分析基礎上，因水質分析涉及水中化學物質的傳遞，必須有很精準的流量及流向預測，管網水質模式分析的理論基礎包括：

- (一)水中溶解性或生成化學物質，因管線的流速在管段(Line 或 Pipe)中水平輸送(Advective Transport)。
- (二)所有入流管流入以流量之權重表示。
- (三)流入儲槽(Storage 之物質在接點(Junction)充分混合，出流物質 Tank)中之物質充份混合。
- (四)物質反應分為在水體(Bulk Water)中反應及水與管壁(Wall)間產生反應，管線水質反應如圖 1 所示，反應速率(Reaction Rate)以單位時間單位體積之質量表示。

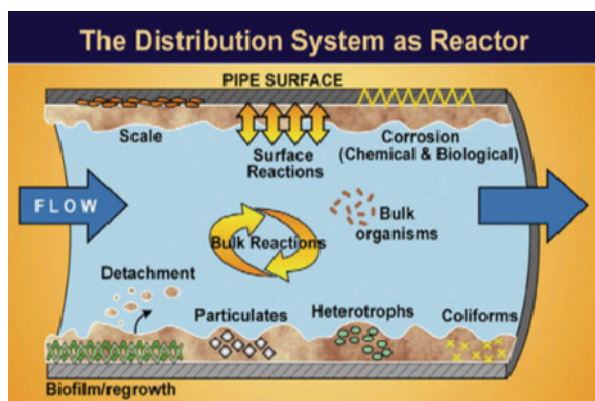


圖 1 管線水質反應模型(USEPA,2005)

以上觀念透過數學方程式，結合起始條

件(Initial Conditions)及邊界條件(Boundary Conditions)求解，可用以預測化學物質在管網中不同時間(Temporal)不同位置(Spatial)之變化狀況。

有反應發生之水質模式預測，採非質量守恆(Non-conservative)方式求解，如自由餘氯和消毒副產物在管網中，持續隨流動及時間而衰減或生成，於接點充分混合後再流入下游之管段中。當進行水齡(Water Age)或來源追蹤(Source Tracing)模擬時，則採用質量守恆(Mass Conservative)觀念處理，水齡模擬時，把水齡當成一物質成分，利用線性老化及混合(Ages and Combines Linearly)方式求解，例如水在水槽中每多待 1 小時，水齡即增加 1；兩股同體積水水齡分別為 6 小時及 12 小時，混合後水齡為 9 小時。來源追蹤亦利用線性混合求解。

三、水質模式建立相關文獻探討

進行水質模式分析前，必須先決定相關反應參數，參考相關文獻，汲取作法與經驗。

Vasconcelos 等人(1997 年)研究管網餘氯衰減之影響因素，並以數個管網系統實測探討餘氯衰減之動力方程式，結果發現餘氯衰減為結合 1 次水體(Bulk Water)反應及 1 次或 0 次壁(Wall)反應之結果。壁反應係數與管壁粗糙係數成反比，且研究顯示以 0 次結果較佳。水體反應係數和壁反應係數在不同管網地點及狀況會有不同，通常 1 次壁反應用於管壁生物膜與氯反應狀態；0 次壁反應則用於管壁腐蝕等還原狀態。無簡易之壁反應常數決定標準程序，僅能用實測值與預測值是否正確，反證所假設之壁反應常數是否正

確。作者研究不同之管網系統，發現新管或大管壁反應較不重要，小管、老管或鑄鐵管則壁反應較顯著。Mostafa 等人(2013 年)就埃及開羅 6th of October city 自來水管網，利用 EPANET 進行餘氯衰減水質模式分析，以 bottle test 求得一次反應 k_b 為 $-0.792/d$ ， k_w 因模式分析管網主要為 DIP 管，故假設為一定值，起始值設為 $-4.0 \text{ mg/m}^2.d$ ，並以現場實測進行校正，以試誤法(Trial & Error)求得使模擬值和實測值最接近時之 k_w 。結果顯示，即使水齡超過 24 小時，餘氯也不會低於埃及法規要求之低限值 0.5mg/L 。將現場檢測點之餘氯日平均值與該點模式預測之日平均水齡值比較，可發現餘氯之衰減與水齡之增加，有相關性。Ali 等人(2017 年)，以伊拉克 Al-Chicook 440 區利用 EPANET 進行餘氯衰減水質模式分析，該區均為 200mm 塑膠管及分支管，以 bottle test 求得一次反應 k_b 為 $-1.368/d$ ， k_w 設為 0(因假設塑膠管內壁為光滑狀態)，以實測值與模式預測值進行比較，結果餘氯均在可接受範圍，模式預測值與實測值在不同採樣日，均非常接近。Georgescu 等人(2012 年)以 42 節點 78 管段 5 萬居民居住區域，固定餘氯加注濃度 0.45mg/L 之管網系統，進行餘氯衰減模式分析，設定 k_b 為 $-0.85/d$ ， k_w 依管徑及流速計算在 $-0.013\sim-0.057\text{m/d}$ ，分析結果顯示，尖離峰餘氯值有差別，尖峰用水時段，餘氯來不及反應即被用掉，餘氯值在 0.41mg/L 以上，離峰時流速慢，餘氯衰減明顯，會降至 0.34 mg/L ，但仍高於法規最低准許濃度。Chan 等人(2012 年)使用 EPANET 2.0 進行管網餘氯衰

減及三鹵甲烷生成模式分析，以協助淨水場決定加氯量。結果發現餘氯消耗因季節、流量及管網而有不同，依不同季節適度調降加氯量。設定淨水場出水餘氯在管網消耗 0.1mg/L 之目標值，重新修訂淨水場出水餘氯不同季節目標值。Clark 等人(1998 年)分析美國加州 NMWA(North Marin Water District)的水質狀況，該供水區有兩個水源，一為 North Marin Aqueduct source，另一為 Stafford Lake source，前者一年 365 天 24 小時全天候出水，後者僅每日早上 6 點至下午 10 點尖峰時段進水，以水理模型利用“trace”分析(二水源分別給 pattern，分別分析)，模擬出各時段各代表點 Stafford Lake source 之流量佔比 %後，進行水質模式分析，決定 6 採樣點進行採樣檢驗，各點以平均摻合比模擬三鹵甲烷生成濃度，再以實測值校正，餘氯衰減則先以 bottle test 求出整體水反應常數，發現誤差過大，再分區設定壁反應常數，用 try & error 方式進行校正。

綜上，水體(Bulk)反應常數 k_b 係以 bottle test 於實驗室決定，壁反應常數 k_w ，若用於存在不同管齡狀況之管網，則以 Vasconcelos 提出之壁反應係數與管壁粗糙係數成反比關係，以 try & error 方式求得，是較適當可行的方法。

四、內湖分區水質模式分析方法

本研究運用 EPANET 2.0，對北水處「內湖分區」進行管網水質模式分析，內容包括「水齡(Water Age)」、「餘氯衰減(Chlorine Decay)」及「三鹵甲烷生成(Trihalomethanes Formation)」等分析。係以北水處校正完成之

水力分析(Hydraulic analysis model)模型為基礎，經蒐集加壓站 Pump Curve(Head vs.Flow)及用水型態圖(Demand Pattern)等實際運轉數據，進行時間動態狀況分析。

內湖分區管網模型，如圖 2，共 20266 個節點(Junctions)，17423 條管線段(Lines)，2 個水源(Tank)分別為大同加壓站配水池及松山加壓站配水池，作為水質源頭點(Water Quality Source Point)。

(一)餘氯衰減模式分析及校正(Calibration)

- 1.於大同加壓站大直線及松山加壓站出水採取水樣，進行餘氯 Bottle tests(方法如(三))，以決定餘氯水體(bulk)反應係數 k_b 。
- 2.於 EPANET 設定 bulk 反應為 1 次，wall 反應為 0 次，輸入 k_b 。
- 3.勘查選定直接水人工實測代表點 15 點(包括松山加壓站及大同加壓站大直線各 1 點)，及該區內既有線上水質監測站，取得座標，確認對應之“節點”。
- 4.直接水人工實測點現場測定餘氯，並紀錄

測定時間(至時)，另取得線上水質監測站 1 日之餘氯時平均監測數據，作為校正數據檔；松山加壓站及大同大直線實測值為 “initial quality” 輸入值。

- 5.利用 $k_w \times C$ (摩擦係數)= α (定值)之關係式，以 Try & Error 方式，代入不同 α 值，執行 EPANET 程式後，將模式分析值與實測值進行比較，檢視校正收斂結果，決定最佳 α 值及模式模擬是否完善。

(二)三鹵甲烷生成模式分析及校正

- 1.於 2 處配水池採取樣進行餘氯 Bottle tests(方法如(三))，以決定三鹵甲烷生成水體反應係數 K_f 及三鹵甲烷最大生成濃度 THM_{max} 。
- 2.反應次數設為 1 次，執行模式分析。
- 3.於區內選定直接水實測點 15 點，採樣進行三鹵甲烷檢測，松山加壓站及大同大直線實測值為 “initial quality” 輸入值。
- 4.將實測值與模式分析值進行比較，判定二者接近程度，以決定模式是否完善。

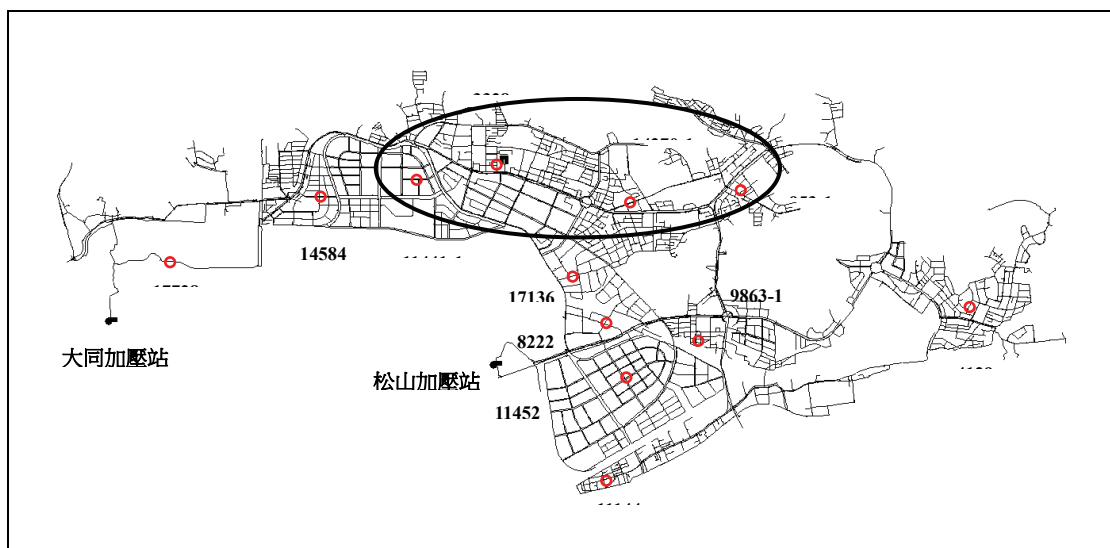


圖 2 內湖分區管網模型及水齡分析結果代表性節點分佈

(三)Bottle test 步驟及反應常數之求取

- 1.棕色採樣瓶先以清潔劑清洗後，裝含氯自來水維持 30min 後，以實驗室純水清洗 3 次，以確認不會耗氯後，作為餘氯試驗瓶。
- 2.準備 10 個餘氯試驗瓶及 10 個洗淨之三鹵甲烷採樣瓶。
- 3.三鹵甲烷採樣瓶除第 1 瓶添加去氯試劑外，餘均不加去氯試劑。
- 4.兩種採樣瓶均在現場同一地點採集相同水樣。現場測定餘氯及水溫，紀錄採樣時間至小時。
- 5.將所有採樣瓶置放約與水溫相當培養箱(20°C)，定溫暗處儲藏。
- 6.每隔 1 天(或 2~3 天)取出餘氯及三鹵甲烷瓶各 1 瓶，分別測定餘氯及三鹵甲烷濃度，記錄之。
- 7.以下述公式分析餘氯衰減水體反應常數 k_b 及三鹵甲烷生成應常數 K_f 與最大生成濃度(即測得之 THM_{max})。

餘氯衰減(Chlorine Decay)水體(Bulk)反應 1 次式 $C = C_0 e^{-(K_b t)}$ ，式中 C 為時間 t 時之餘氯濃度， C_0 為起始時間時之餘氯濃度， K_b 為餘氯衰減水體反應常數， t 為時間(d，天)。將 $\ln(C/C_0)$ 對 t 作圖，斜率為 $-k_b$ ，求得 k_b 值(為負值，單位為 1/d)

三鹵甲烷生成(Trihalomethanes Formation)通常假設三鹵甲烷之生成僅與水體有關，與壁無關，反應 1 次式

$$C_t = C_0 + (C_{max} - C_0)(1 - e^{-(K_f t)})$$

式中 C_t 為 t 時間時三鹵甲烷生成濃度， C_0 為起始時間時三鹵甲烷生成濃度， C_{max} 為無限時間時三鹵甲烷生成濃度(即 THM_{max})，將 $\ln((C_{max} - C_t)/(C_{max} - C_0))$ 對 t 作圖，斜率為

$-k_f$ ，求得 k_f 值(應為正值)；，此 k_f 即 EPANET 中輸入之 k_b 。

(四)EPANET 2.0 之分析功能

EPANET 2.0 內建許多分析功能，可充份運用於水質模式分析，有助於對分析結果之全面瞭解。在進行水質模式分析校正後，可檢視校正結果，內容包括實測值與模擬值間之各項統計結果與圖表。完成分析後，整個模擬分析結果可以動畫顯示不同時間空間之變化狀況，亦可運算及顯示時間區間內之模擬結果最大值、最小值或平均值等分佈；各節點或連結可個別或群組顯示時間序列圖(Time series plot)、上游至下游剖面圖(Profile plot)、等高線分佈圖(Counter plot)及頻度分析圖(Frequency plot)等

五、水質模式分析結果

(一)水齡模式分析結果

將水體及壁反應次數均設為 0 次；水體反應係數設為 1(即時間增加 1 小時水齡就增加 1 之義)，Limiting Concentration 設為 0(即最好狀況水齡為 0)，執行分析之。

由內湖分區內任取 12 個節點(分佈如圖 2)，作時間序列圖分析，結果如圖 3 所示，節點水齡分佈於約 3~17 小時，大致而言，圖 2 黑色框內節點水齡較大，且呈現隨時間變化，節點間無明顯規則性尖離峰出現，其他區域節點則呈現穩定水齡，無尖明顯尖離峰變化。而具水齡隨時間變化節點，各節點水齡最大變化範圍僅約 6~7 小時。

取離峰用水狀況視為約每日下午 4 時，尖峰用水狀況視為約每日下午 8 時，水齡分佈顯示尖離峰用水對水齡分佈狀況影響很



小，水齡分佈穩定，僅交界處(內二場加壓站一帶)呈現有較明顯隨時間變化狀況，應與區內有 2 大型加壓站配水池尖離峰互補支援供水有關。

(二)餘氯衰減模式分析

內湖分區有 2 個加壓站配水池同時供水，若水的來源(如水中天然有機物 NOM 濃度)不同，可能影響管網各處的餘氯衰減狀況。故分別以松山加壓站及大同加壓站配水池水樣進行 Bottle Tests，求得 k_b 分別為

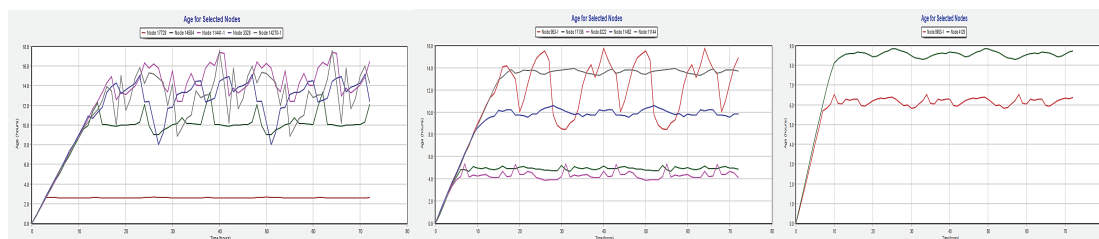


圖 3 內湖分區代表性節點水齡分析結果時間變化圖

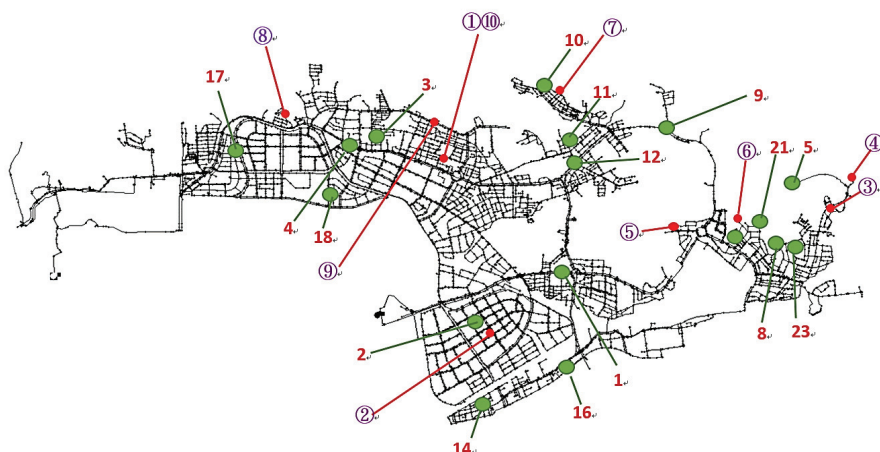


圖 4 餘氯衰減模式分析校正點分佈圖(有圈數字為線上偵測站；數字為人工實測點)

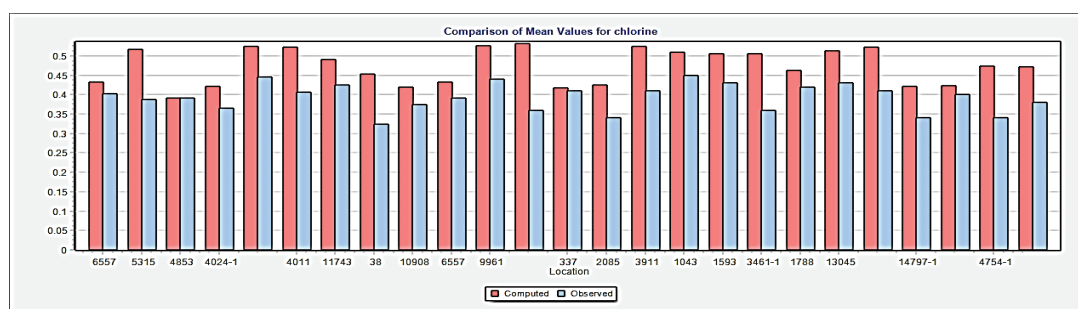


圖 5 $\alpha=20$ 時，餘氯校正點實測值與模式值比較

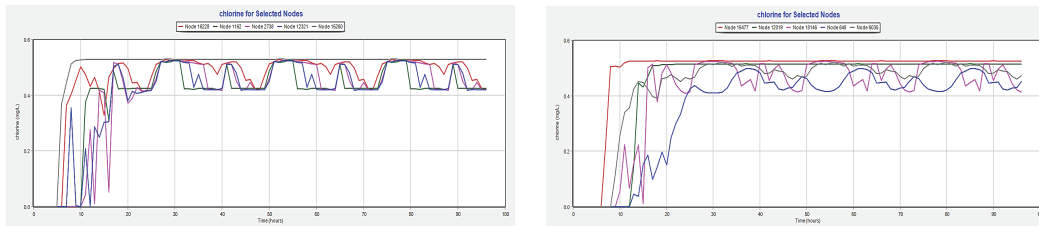


圖 6 內湖分區節點餘氯隨時間變化狀況

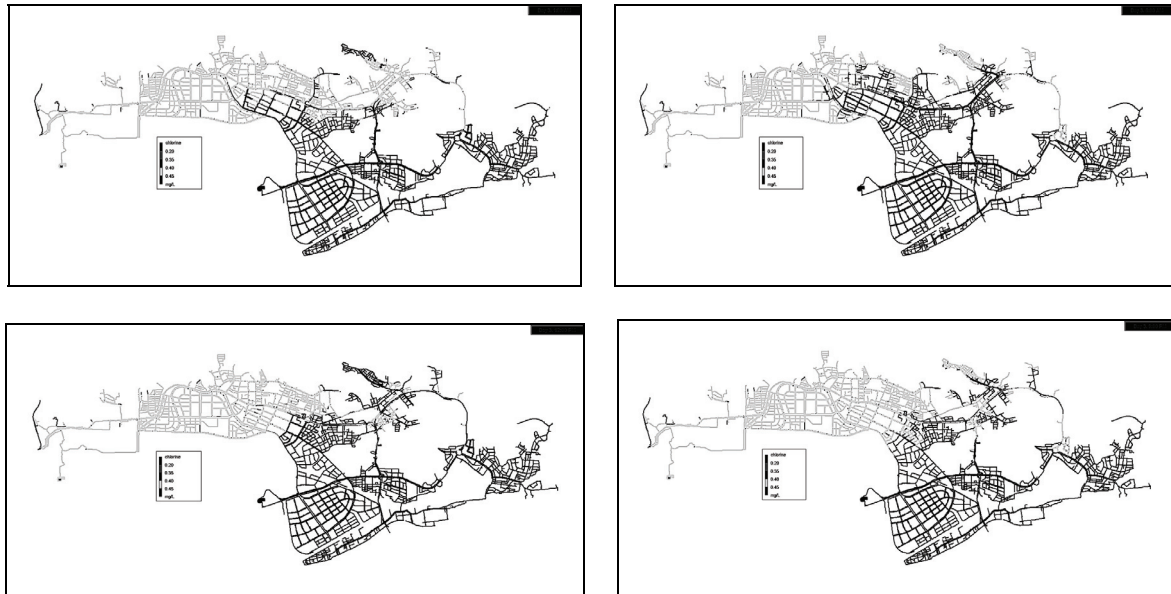


圖 7 內湖分區尖離峰用水餘氯分佈變化

(左上：離峰(49hrs，清晨 1 點)；右上：離峰(54hrs，清晨 6 點)；
左下：尖峰(60hrs，中午 12 點)；右下：尖峰(69hrs，晚上 9 點))

-0.1116 及-0.097(1/d)，二者極為接近，可視為相同水質狀況，故取平均值為-0.1043。配水池(Reservoirs)的 initial quality 依實測值分別設為 0.54 mg/L(松山)及 0.44 mg/L(大同)，水體反應次數設 1 次，Global bulk coeff.設為-0.1043，壁反應次數設 0 次，Limiting concentration 設為 0，校正用現場實測點包括線上水質偵測站 10 處，每測站每小時有一實測值；另 17 處實測點，每 1 實測點具單一時間點實測值，校正點分佈如圖 4，試不同 α ，執行分析，求得最適 α 值為 20，校正點實測值與模式值比較，如圖 5，校正結果顯示，模式預測值與實測值相差大於 0.1mg/L

者共 8 點，大多位於區域邊緣者，顯示於建立內湖分區水理模型時，刪除小型加壓站管網，於該小型加壓站供水小區內管網節點之模擬預測值，較不能代表該管網內之實際水質狀況，須另以小區管網模擬分析區內水質狀況。

區內由上游至下游任選 10 節點作時間序列圖，如圖 6 所示，可發現各節點餘氯隨時間變化很小，無規則性尖離峰表現，變化量約在 0.1mg/L 之譜。

以一般認知之尖離峰各用水時段進行餘氯模式分析，餘氯分佈如圖 7 所示，顯示於大同及松山加壓站供水管網交界處出現

變化，由於松山加壓站餘氯(0.54 mg/L)較大同加壓站(0.44 mg/L)高，於離峰用水時段松山加壓站出水量較大，餘氯大於 0.45 mg/L 區域擴大；反之，尖峰用水時段餘氯大於 0.45mg/L 區域縮小。

以平均餘氯及最低餘氯分佈比較，如圖 8，僅右圖黑框區域出現最低值低於平均值狀況，惟餘氯亦均在 0.40~0.45 mg/L 間，顯示管網餘氯極為穩定。餘氯衰減反應主要來自氯與水體(Bulk)之反應，占 96.3%，來自管壁者很少僅占 3.7%。由前述分析區內管網餘氯消耗量均低於 0.1 mg/L 判斷，自來水中耗氯物質濃度極低，水質優良，且管網管線內壁潔淨，無生物膜產生。

(三)三鹵甲烷生成模式分析

進行管網三鹵甲烷生成模式分析前，須先進行生成反應常數 K_f 之求取，試驗方式為由 2 個供水來源，大同加壓站配水池及松山加壓站配水池，分別進行 Bottle Test，求

取 K_f 。由於水中三鹵甲烷濃度低，存在試驗及檢測誤差，以原始試驗數據先求出三鹵甲烷最適生成曲線為 $C=4.8792\ln(t)+8.6058$ ， $C_{\max}=24.68 \mu\text{g/L}$ ；由最適曲線算出最適值後，再利用 $C(t)=C_0+(C_{\max}-C_0)[1-\exp(-k_f t)]$ 公式，求出反應常數 k_f ，求得 k_f 分別為 0.138 及 0.135， $C_{\max}$ 分別為 $24.68 \mu\text{g/L}$ 及 25.10，二者極為接近，顯示水質幾乎相同，故 k_f 取平均值 0.136，最大生成濃度取平均值為 24.89，執行生成模式分析。輸入反應次數為 1；Global bulk coeff. 0.136；Limiting concentration 24.89，大同加壓站及松山加壓站 initial concentration 分別輸入實測值 6.26、6.06，另輸入現場實測校正檔(15 點)，執行模式分析，校正結果良好。任選區內 10 節點作時間序列圖，如圖 9，可發現三鹵甲烷隨時間變化很小，變化濃度約在 $1.0 \mu\text{g/L}$ 之譜，各點間無規則性尖離峰表現。



圖 8 內湖分區平均餘氯(左)與最低餘氯(右)分佈比較(第 3 天)

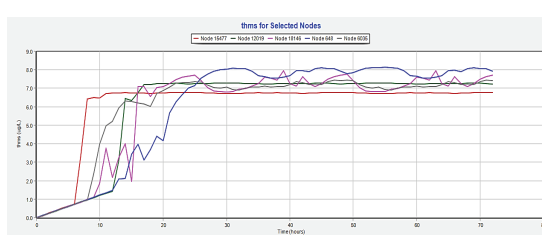
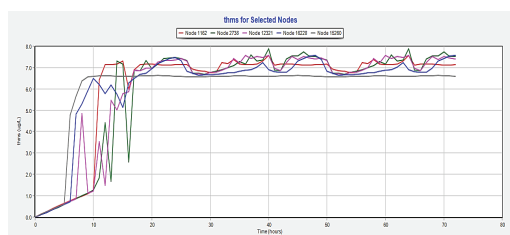
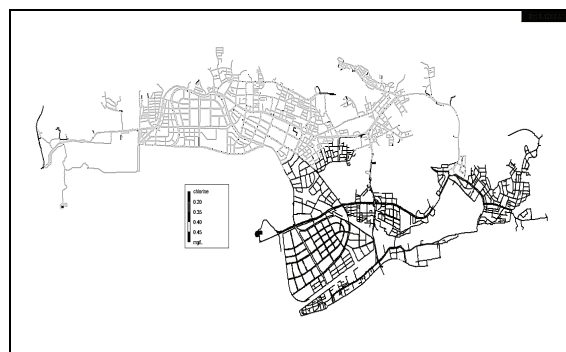


圖 9 內湖分區節點三鹵甲烷生成濃度隨時間變化圖

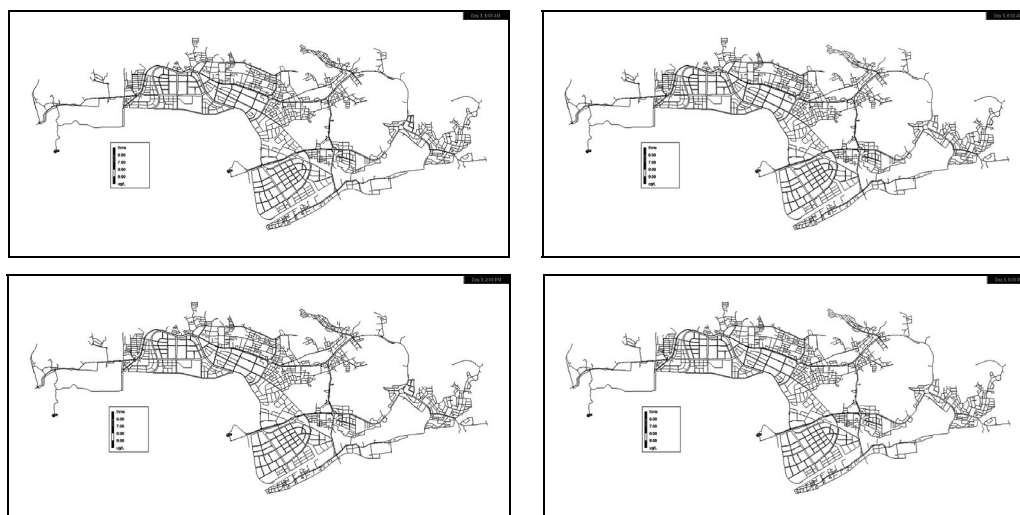


圖 10 內湖分區不同時段三鹵甲烷生成分佈狀況

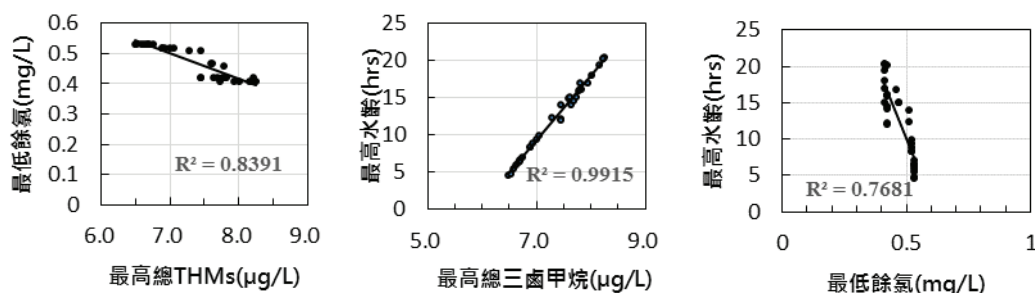


圖 11 內湖分區最高三鹵甲烷、最低餘氯與最高水齡間之相關性

管線段(Lines)最高三鹵甲烷累積頻度分析，顯示三鹵甲烷濃度無超過 $9.0 \mu\text{g/L}$ 者，均介於 $6.5 \sim 8.5 \mu\text{g/L}$ ，水質狀況優良，不同時段三鹵甲烷生成分佈狀況如圖 10，全區整體變化不大。

(四)不同水質參數間之相關性分析

以內湖分區之最高水齡、最高三鹵甲烷、最低餘氯分佈結果，探討其相關性。於區內由水源近端至遠端任取 32 節點，取上述數據，進行分析，如圖 11，結果顯示，雖最高三鹵甲烷及最低餘氯變化範圍很小，但仍有最高三鹵甲烷隨最低餘氯之降低而增加趨勢、最高三鹵甲烷隨最高水齡增加而增高趨勢及最低餘氯隨最高水齡增加而降低

之趨勢。

(五)餘氯摻合(Blending)分析

為瞭解內湖分區管網餘氯，受大同(配水池餘氯 0.44mg/L)及松山(配水池餘氯 0.54mg/L)加壓站配水池餘氯之影響，利用 EPANET 中“trace”功能，進行大同配水池餘氯擴散分析，選取 2 配水池影響區域邊界點 5 節點，以 2 配水池餘氯值利用節點摻合(Blending)百分比，計算 1 天中不同時間之摻合餘氯值，找出(二)節分析餘氯衰減模式時，該 5 節點之餘氯值進行比較，結果顯示，除可能因處於內湖分區邊緣節點(2369)，餘氯預測值與摻合計算值誤差略大(最大約 0.1mg/L)外，其餘節點餘氯預測值與摻合計

算值幾乎吻合(圖 12)，顯示兩加壓站供水交界區之餘氯值，受兩加壓站配水池之來源餘氯濃度影響較大，幾乎不受管網中滯留時間影響，管網內壁之潔淨度佳，與餘氯之反應度低，與(二)節分析結果吻合。

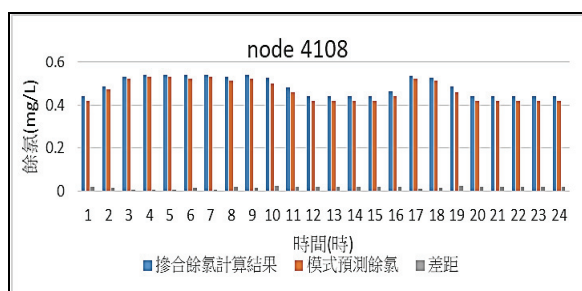


圖 12 餘氯摻合分析結果比較

(六)加氯控制分析

目前內湖分區管網供水餘氯穩定，餘氯隨時間及地點變化小，假設基於節約加氯量、存在季節性水溫變化(夏季餘氯揮發較快)或降低餘氯量以降低民眾察覺氯味等因素，想瞭解該區源頭(大同加壓站及松山加壓站配水池)餘氯低於何值時，管網餘氯會低於法規標準下限 0.2 mg/L，此可透過改變民生加壓站及松山加壓站配水池 initial concentration 的方式，以模式分析管網最低餘氯分佈，分析結果看出，直到 2 配水池餘氯維持低至 0.2 mg/L，管網才出現不符飲用水水質標準(餘氯低於 0.2 mg/L)狀況，此例可作為淨水場出水或管網源頭餘氯調控管網全區餘氯之參考。

六、管網水質模式之應用方向

使用 EPANET 建立管網水質模式之應用方向極多，由第五節實際分析之內容即可印證，綜整文獻記載，整理主要應用方向及使用功能如下：

(一)管網水質之管理與掌握

管網水質(包括自由餘氯及三鹵甲烷)會隨在管網中不同管線設備狀況及不同用水型態(Demand Pattern)而變，傳統確認管網水質之方式為建立代表性採樣點，進行隨機採樣檢驗，以決定是否符合飲用水水質標準，但忽略水質會隨管網不同地點不同時間變化之事實，透過管網餘氯衰減(Chlorine Decay)模式及三鹵甲烷生成(Trihalomethane Formation)模式之建立，可全面掌握管網水質時(Temporal)空(Spatial)變化，作更細緻且完整之水質管理。另亦可透過水質參數相關性分析，瞭解相互間影響，作為水質指標性判斷之基礎。

(二)輔助管線設備之改善與資產管理

在進行水質模式分析時，可利用水齡(Water Age)分析發現一些管網滯留較嚴重(水齡較高)之區域，可回饋管線管理單位，透過管線系統改善(如連通或調配)改善水質。另外在進行水質模式校正(Calibration)時，會發現實測值與模擬值相差較大區域或地點，可透過與管線管理單位研討，確認該區域之管線資訊、供水狀況及制水閥啟閉狀況等，找出設備狀況影響分析之可能原因，而獲得管網系統設備資訊之充分掌握。

(三)污染源追蹤

管網中常發生計畫性或緊急性施工與啟閉閥栓，造成管垢沖出等水質污染事件，如為計畫性者，可透過追蹤(Trace)分析功能，事先瞭解可能影響區域，作事前之防範；如為非計畫性者，亦可於事件發生後，透過此分析功能，作緊急性之事後處置(如排水等)。國外有因發生區域性微生物污染事

件，透過追蹤功能，結合水質檢驗結果，找出污染源者；亦有規劃洗管計畫事先模擬可能影響區域者，均為可應用之範疇。

(四)加氯控制

管網餘氯會受季節性水溫變化影響，在夏季淨水場會酌予調高加氯量，冬季則酌予調低，如能運用管網餘氯衰減(Chlorine Decay)模式分析，可充份瞭解季節性調整加氯量，對管網餘氯分佈狀況之影響，是否會在部分地區或管末端區，發生餘氯過高或不足狀況。分析結果可作為調整淨水場加氯之參考。若有節約加藥費用或降低民眾反映自來水氯味需求，可以此為基礎進而調低加氯量，另可應用若原水水質改變或切換不同水源狀況。

(五)水源摻合影響評估

供水區具有 1 個以上水源，如高地水源與平地水源聯合運用，可能因不同水源水質，及(或)非連續使用其中某水源，而於不同地區及時間對管網水質產生影響。產生的影響包括餘氯(消毒劑)之消耗與微生物再生、三鹵甲烷之生成、臭味問題及水色(鐵錳)等。透過追蹤(Trace)分析及餘氯衰減(Chlorine Decay)合併應用，可瞭解管網水質發生問題的區域及原因，尋求問題的解決。

(六)線上水質監測站設置位置之選擇

水質模式可用於管網下毒反恐演練，亦可用於評估管網設置線上水質監測站之代表性，透過追蹤(Trace)分析，可瞭解不同管網地點受某 1 侵入點之影響程度及影響反應時間，藉此可評估能適時產生警示之線上水質監測站之最適合設置地點，或該水質監測站所能代表之管網水質區域。

七、結語

使用 EPANET 進行管網水質模式分析，具有免費、易學及分析功能強等優點，對自來水管網水質之瞭解、掌握、預測、評估及異常追蹤，極有助益，可輔助人工採樣檢驗上之不足。以優良之水理分析模型為基礎，透過良好的反應常數測試及實測校正，可提升水質模式預測之準確性與可用性，自來水事業可檢討常遇水質境況，結合 SCADA 系統，建立日常應用功能模組與即時分析顯示功能，以充分發揮其應用功效。

參考文獻

1. Water distribution system analysis :Field studies,modeling and management A reference guide for utilities,USEPA,2005.
2. Cooper James Philip, Development of a chlorine decay and total trihalomethane formation modeling protocol using initial distribution system evaluation data , Dec.2009 ,The University of Akron.
3. Clark Robert M. and Walter M.Grayman , Modeling water quality in drinking water distribution systems,AWWA,1998.
4. Computer modeling of water distribution systems , AWWA M32,4TH Edition,2017.
5. Vasconcelos John J. et al.,Kinetics of chlorine decay.J.AWWA,89:7:54 ,1997.
6. Ahn Jae Chan et al.,Application of EPANET for the determination of chlorine dose and prediction of THMs in a water distribution system,Sustain.Envirn.Res.22(1),31-38, 2012.
7. Mostafa Nagwan G. et.al.,Simulation of chlorine decay in water distribution networks using EPANET-case study, Civil and Environmental Research ,3:13,2013

8. Al-Musawi Nawar Omran Ali et.al., Simulation of chlorine decay in AL-GUOOK water distribution networks using EPANET paper Applied Research Journal, 3:9, 2017.
9. Nagatani Toru et.al., Residual chlorine decay simulation in water distribution system, The 7th international symposium on water supply technology, Yokohama, Japan, 2008.
10. GEORGESCU Andrei-Mugur et al., Chlorine concentration decay in the water distribution system of a town with 50000 inhabitants, U.P.B.Sci.Bull.Series D, 74:1, 2012.
11. Characterization and modeling of chlorine decay in distribution Systems, 1996, AWWARF.

作者簡介

薛志宏先生

現職：台北自來水事業處水質科科长

專長：水質管理、淨水處理

張凱迪先生

現職：台北自來水事業處四級工程師

專長：水質檢驗

李佳陵女士

現職：台北自來水事業處四級工程師

專長：水質檢驗

新店溪原水臭度物質調查與處理方法研究

文/魏旭毅、曾俊華、蔡松恩、廖睿宏、李育輯

摘要

由於全球溫室氣體濃度增加，強化大氣熱能吸收，進而提高氣溫，澇旱加劇，使用地面水作為水源之自來水淨水場，原水水質受到影響，極可能面臨藻類滋生及水體土霉味等相關問題。

本研究將收集分析台北水源區原水中影響感官(味覺、嗅覺)物質、國內外淨水場水源水質控制技術及嗅度監測技術之相關文獻資料，以了解國內外淨水場實際執行上可能遭遇之困難並找尋對應之解決方案。國內淨水場水源水質嗅度之相關研究絕大部分集中於台灣中南部及外島水庫水源，新店溪水系與現有案例不同，可透過研究分析，評估現有自來水淨水場控制處理流程之改善，對感官物質去除之成效。研究中依所建立之固相微萃取法濃縮、配合氣相層析質譜儀，可以有效分析鑑定水中五種代表性土霉味物質。整體而言，土霉味物質以 2-MIB 最易被偵測到，而 Geosmin 則出現在 2-MIB 濃度高時。台北地區主要淨水場監測結果顯示，三個地面水水場水源中均曾發現有 2-MIB 與 Geosmin 的存在。

關鍵字：earthy/musty/moldy、2-MIB、Geosmin、PAC、HSDM

一、前言

台灣台北地區之淨水流程處理，是取自新店溪水系之直潭壩與青潭堰原水，由南勢溪、北勢溪會合為新店溪而成，而翡翠水庫位於北勢溪負責調節原水量，原水水質優

良；惟 104 年蘇迪勒颱風過後上游水源保護區，大量崩塌與水土流失，造成河道淤積，取水壩堰有效容積減少。

近幾年經原水試驗，水體嗅度物質亦有增長之趨勢，其中又以土霉味物質最為明顯，面臨新店溪水系原水水中嗅度物質增長，本研究將探討其生成原因與因應對策，評估了解大台北地區水源水質嗅度物質之變化，並確認因應可行的控制方案，以降低原水感官物質發生機率。

為探討新店溪原水嗅度生成原因與因應對策，藉由相關研究，以評估台北水源區水質之情勢，針對新店溪水系青潭堰蓄水區域內之原水中，曾經出現較高濃度的嗅度物質，探討其臭味生成原因、可能生成地點與生成頻率之變化，以及原水水體中發生大量嗅味物質時，淨水場淨水處理之因應對策、並確認可行之控制方案，防止淨水場清水水質異味的情形，提升淨水場水質嗅度控制之應變能力及出水品質，確保自來水水質優良與民眾用水安全。

二、水中臭味的種類與成因

(一)水中臭及味的種類

自來水中造成味(taste)的則可分成酸(sour/acidic)、甜(sweet)、苦(bitter)及鹹(salty)四種，而臭味(odor)之種類共可分為八類(Suffet et al., 1999)，即土霉味(earthy/musty/moldy)、氯味(chlorineous/ozonous)、草味(grassy / hay straw)、沼氣味(marshy /

swampy)、芳香味(fragrant / vegetable / fruit / flowery)、魚腥味(fishy)、藥水味(medicinal/phenolic)及化學藥品(chemical/hydrocarbon)等,前者(味)是指舌頭味蕾上所造成的感覺,而後者(臭)則指在鼻腔內所接收的化學信息。配合口、鼻共通的感覺(mouth feel/nose feel),味及臭可以圖 1、臭味輪(taste-and-odor wheel)表示出,臭味輪中並有其相對應之可能造成臭味之化學物質(Suffet et al., 1999)。

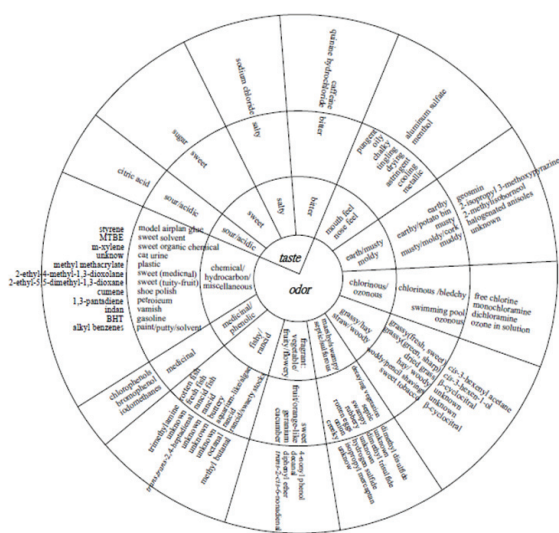
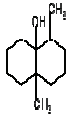
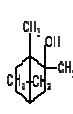
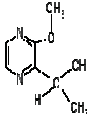
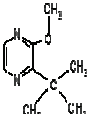
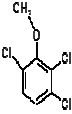


圖 1 臭味輪-水中臭與味分類及可能造成之化學物質 (Suffet et al., 1999).

自來水中臭味的來源可分為原水中人為污染,原水中天然來源、處理廠程序造成及配水管線中形成等四類。原水中人為污染如工、農、畜牧業廢水排放,原水中天然來源如藻類、硫還原菌等釋放出之代謝物(Izaguirre and Devall, 1995),處理程序中如加氯及加臭氧等單元均會造成臭味,而配水管線中若生物膜過多或外來污染物洩漏入管線中也會形成臭味。在各類的臭味來源中,加氯消毒為臭味最大之來源,加氯消毒

主要造成的臭味是消毒水味。此外,在原水中藻類由生長而釋放的代謝物所佔臭味發生比率為最高,例如土霉味及魚腥味均是藻類所產生的,表 1 為五種常見的土霉味物質。

表 1 五種常見的土霉味物質

異臭味物質	trans-1,10-dimethyl-trans-9-decalol (Geosmin)	2-methylisobornol (2-MIB)	2-isopropyl-3-methoxy pyrazine (IPMP)	2-isobutyl-3-methoxy pyrazine (IBMP)	2,3,6-trichloroisole (ICA)
分子式	$C_{12}H_{22}O$	$C_{12}H_{20}O$	$C_{12}H_{18}ON_2$	$C_{12}H_{18}ON_2$	$C_{11}H_7Cl_3$
分子量	182	168	192	166	222
結構式					
臭味閾值量 (ng/L)	10	29	7	1	2

(二)臭味物質的來源鑑定

臭與味物質視其發生位置與種類而有不同的來源鑑定方法,由於台灣地區水廠最常見的口感問題是土霉味,因此以土霉味說明該類臭味物質的來源鑑定。地面水水源中土霉味,一般認為是由藻類或放線菌代謝而產生,因此在了解或初步判定微生物(或藻類)是造成臭味的可能原因時,必須得到三種不同證據,以確認臭味的成因,包括生態上(原水中微生物與臭味的同時存在),感官上(純化後的微生物能在水中產生相同味道)及化學上(在純化後的微生物的水中及原水中均能測到同一臭味物質)。

常見產生臭味物質的藻類包括有藍綠藻(Cyanophyta),金黃藻(Chrysophyceae),矽藻(Bacillariophyceae)及甲藻(Pyrophyta)四大類(Izaguirre and Devall, 1995)。許多研究人員由不同的藻類培養中,分離出不同藻類會產生的臭味物質。Palmer 早在 1962 年即整理出五十多種會產生不同臭味的藻屬。但近年來

因化學分析技術的精進，才進而有辦法分析出造成臭味的物質。

土霉味是最容易存在於飲用水中的一種生物代謝臭味，而放線菌是最早被發現能造成土霉味的微生物。早在 1965 年 Gerber 及 Lechevalier 即由 *Streptomyces grius* 中分離土臭味物質，稱之 Geosmin，其後也相繼有許多研究人員在不同放線菌種中發現相同土臭味物質 (Mallevialle and Suffet, 1987)。其後另一種土臭味物質 (MIB, 2-methylisoborneol) 也在自來水臭味事件中被分離出來。後續的研究至少已鑑定出超過數十件的放線菌會產生 Geosmin 及 MIB (Mallevialle and Suffet, 1987 ; Suffet and Mallveialle, 1995) (如下表 2、表 3)。

表 2 水中引起土霉及魚腥味之化學物質

化學物質	來源
土霉味	
Geosmin	放射菌 藍綠藻
2-MIB	放射菌 藍綠藻 綠藻
IPMP	放射菌
Cadinene-ol	放射菌
魚腥味	
n-hexanal	鞭毛藻及矽藻
n-heptanal	
Decadinal	金黃藻
trans,trans-2-4-hepta dienal	未知藻類
trans,4-heotenal	
2t,4c,7c-decatrional	金黃藻
2t,6c-nonadialal	

表 3 已經鑑定會產生臭味化學物質之藻屬

藻屬	臭味 種類	臭味化合物
藍綠藻		
Anabaena	土霉味	Geosmin
Aohanizomenon		Geosmin
Figcherella		Geosmin
Lyagbya		Geosmin
Oscillatoria		Geosmin 及 MIB
Phormidium		Geosmin
Pseudanabaene		Geosmin 及 MIB
Schizothrix		Geosmin
Symploca		Geosmin
Synechocystis	MIB	
鞭毛藻類		
Uroglena	魚腥味	Heptadienals
Synura 及 Dinobryon		2t,4c,7c-decatrional
		2t,6c-nonadialal

(三)臭味物質的分析方法

水中異臭味物質的分析方法一般來說可分為感覺分析法(sensoryanalysis)及化學分析法(chemical analysis)。對於水中臭味的分析，最初是使用臭味閾值(threshold odor number，TON 或稱初嗅數)來表示，但因人為及主觀意識容易造成實驗誤差，美國南加州都會區的水公司(The Metropolitan Water District of Southern California, MWDSC)開始採用應用於食品業之嗅覺層次分析法(Flavor profile analysis，FPA)，此方法目前已成為歐美許多個水廠採用的臭味分析方法，並已可達到部份定性或定量的程度(Suffet et al., 1988; Suffet and Mallevialle,1995)，且已列入水質分析標準方法中(Standard Method 2170) (APHA,1995)。除 TON 外，另外有嗅覺計分

評估法(Flavor Rating Assessment, FRA)，該法為用於評估消費者對於飲用水水質接受程度之方法(Standard Method 2160C)，通常有 100 個以上的測試員參與測試。

化學分析法則包含多種濃縮方法再配合氣相層析分析，濃縮方法如吹捕濃縮法(purge and trap)、封閉式迴路氣提法(Closed-loop stripping analysis, CLSA)、固態微萃取法(Solid-phase microextraction, SPME)、蒸氣蒸餾法(Steam Distillation Extraction, SDE)及液相萃取法(Liquid-liquid extraction, LLE)方法等。前三種方法用於濃縮非極性及中間分子量的揮發性較高之臭味有機物，後兩種方法則用於濃縮極性及分子量較大的臭味有機物。

三、水體土霉味物質之採集分析

(一)新店溪原水蓄水範圍之水體採集

地面水水源中土霉味，一般認為是由藻類或放線菌代謝而產生，因此必須了解水體中微生物存在而造成臭味，以確認臭味的成因。新店溪流域原水產生之臭味型態為土霉味，且發生時間大約於春季至夏季等高溫且乾旱之時期，因此本研究選定採樣期間為 5 月至 10 月，堰壩水位較低、天氣晴朗且多日未降雨後進行採樣。

進行採樣分析地點(詳圖 2、圖 3)，計畫以長興及公館淨水場，針對其水源及處理程序以及沉澱池淤泥、過濾池反沖洗砂水，以土霉味化合物為主要分析對象。

(二)水體土霉味物質之實驗及分析方法

本研究使用固相微萃取法(Solid Phase Micro Extraction, SPME)分析水體中之土霉味

物質。固相微萃取法(SPME)是利用特製針頭，內含一覆蓋特殊選擇性吸附劑之矽纖維，將針頭打入待測樣品之樣品瓶頂部空間，再將矽纖維伸出使之吸附存於氣態之臭味物質，吸附固定時間後再將針頭取出，打入 GC 注入口使吸附矽纖維上吸附劑之臭味物質脫附進入 GC/MS 分析。固相微萃取法分析水中的超微量臭味物質，必須視水中臭味化合物的種類不同，而選擇使用不同的吸附劑材質。其吸附纖維特點必須對欲分析物種有強選擇吸附性。



圖 2 新店溪流域取樣分布圖



圖 3 現場原水及底泥採樣

四、改進土霉味去除效率之方法

(一)活性碳吸附

活性碳是將煙煤、椰殼、木屑或煤炭等含碳物質，經高溫(600℃ ~ 800℃)加熱後，再經水蒸氣或二氧化碳於 800~900℃ 活化處

理而成。由於具高多孔性及高比表面積，故可作為吸附劑，依外觀分為粉狀活性碳(PAC)及粒狀活性碳(GAC)兩類。粉狀活性碳為一般直徑介於 10~100 μm 的微粒碳粉；而粒狀活性碳顆粒尺寸通常介於 0.4~2.5 mm。

活性碳常用的性質有「比表面積」、「孔徑分佈」、「碘值」等，活性碳比表面積一般介於 500~1500 m^2/g ，比表面積越大吸附能力越大。孔徑分佈分為粗孔 (Macropore，孔徑大於 50nm)、中孔(Mesopore，孔徑介於 2~50nm)及微孔(Micropore，孔徑小於 2nm)，微孔所占體積越大，比表面積越大，但仍需存在一部份粗孔與中孔，作為被吸附物質進入微孔通道。活性碳顆粒大小，僅影響吸附速率快慢。一般所謂「中孔碳」指至少 50%總孔體積落於中孔範圍，小於 25%落於粗孔範圍之粉狀活性碳。文獻中指出，活性碳對於臭味物質 Geosmin 和 2-MIB 的吸附主要在微孔發生，2-MIB 的分子直徑大約在 0.5~0.6 nm 之間，例如 Yu et al. (2007)發現吸附量與微孔孔隙體積最相關，另外 Newcombe et al. (2002)發現吸附量與 1-1.2 nm 孔隙體積成正比(Newcombe et al., 2002)。「碘值(Iodine Index)」用以表示吸附低分子量化合物的能力，一般至少需大於 500 mg/g。

國內外針對粉狀活性碳於水處理之標準規範包括美國自來水協會(AWWA B600-10)、英國標準(BS EN 12903: 2009)、日本下水道協會(JWWA K113: 2005)與中國大陸(GB/T 13803.2，木質淨水用活性碳)等標準。台灣目前對於水中粉狀活性碳於水處理並無相關之標準，僅規範碘吸附力(>1000 mg/g)、1%懸浮浸出液 pH (7~11)、灰份

(<15%)、含水率(<40~50%)與 200mesh 篩目篩除殘留(< 10%)。

(二)活性碳的加注點

在淨水程序中添加活性碳的操作方式是在混凝單元前與混凝劑一起加入，而混凝劑對活性碳之吸附可能會造成影響。混凝劑在水解形成膠羽過程中，如有活性碳存在，鋁鹽水解產物將以活性碳為核心形成膠羽，水中之被吸附物質可能因為膠羽阻隔而無法被活性碳吸附，降低活性碳吸附能力，或因需擴散通過活性碳外圍膠羽，而延長活性碳吸附時間(Sontheimer et al., 1988)。Simpson(1998)對美國弗羅里達州 Manatee 給水廠進行活性碳最佳操作效能實驗，發現活性碳在混凝程序前添加具有最佳去除效果，而在膠羽形成及高混凝劑量的操作條件下可能會妨礙活性碳吸附臭味物質，造成吸附量降低。

另淨水程序中的前加氯措施，水中的餘氯對於活性碳的吸附量卻有顯著的影響，文獻發現隨著水中餘氯濃度的增加，活性碳對 2-MIB 的吸附量隨之下降，而且水中餘氯還會氧化活性碳吸附表面，使已經被活性碳吸附的 2-MIB 再度被釋放出來，造成濃度的上升(Gillogy, 1998)。

吸附反應需充足的接觸時間是活性碳控制嗅味問題的基礎，一般來說，活性碳的投加都在水場內，但水場內投加活性碳存在時間短、不能充分利用活性碳吸附能力。淨水場由於場地的限制，難保有充足的反應時間，為彌補反應時間的一個方法是把投加點放到取水口處。取水口至場內至少有一段接觸時間，比起在分水井處投加，其接觸時間

僅有數分鐘，同時與混凝劑的相互作用對活性碳的吸附也有影響。

綜上，淨水場皆有使用混凝劑、前加氯及後加氯，故選擇於取水口加注活性碳，以延長活性碳吸附臭味物質的接觸時間，及避開與混凝劑的起始反應為佳。

(三)青潭堰原水中 2-MIB 及 Geosmin 流佈

本研究使用固相微萃取法(Solid Phase Micro Extraction, SPME)分析水體中之土霉味物質。固相微萃取法(SPME)是利用特製針頭，內含一覆蓋特殊選擇性吸附劑之矽纖維，將針頭打入待測樣品之樣品瓶頂部空間，再將矽纖維伸出使之吸附存於氣態之臭味物質，吸附固定時間後再將針頭取出，打入 GC 注入口使吸附矽纖維上吸附劑之臭味物質脫附進入 GC/MS 分析(詳圖 4)。

固相微萃取法分析水中的超微量臭味物質，必須視水中臭味化合物的種類不同，而選擇使用不同的吸附劑材質。其吸附纖維特點必須對欲分析物種有強選擇吸附性。

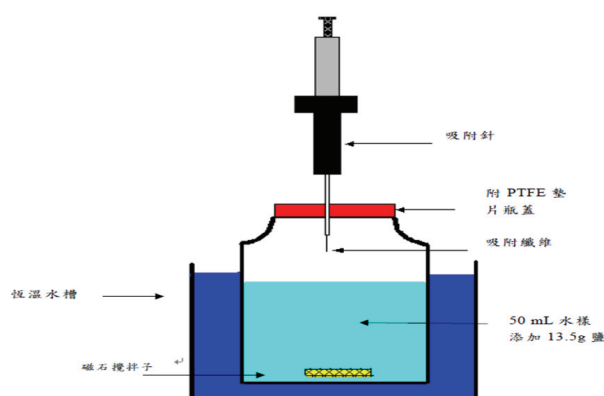


圖 4 固相微萃取法(SPME)配置圖

本研究為了解新店溪青潭堰水庫區域內之土霉味可能發生原因，於青潭堰庫內多個地區採集上層原水水體及其相對應位置

之庫容底泥，採樣分析地點如圖 5 所示。

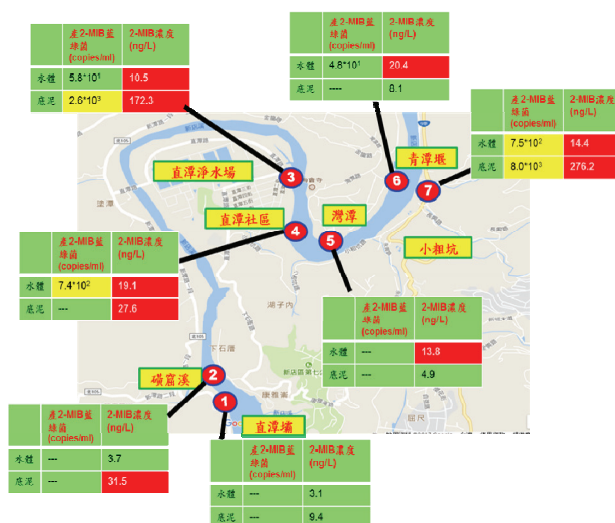


圖 5 青潭堰原水臭味物質(2-MIB)採樣點相對位置圖及其濃度分布

地點包含海會寺、直潭社區、灣潭、蘭溪匯流口、青潭堰及直潭壩下游區域採樣期間由 106 年 9 月至 108 年 10 月，其數據綜整如表 5。由表可看出於 106 年 9 月青潭堰水庫內所採集之上層原水中具有超過嗅味閾值(10ng/L)之 2-MIB，其濃度介於 10.5~20.4 ng/L，同時於相對應之位置之底泥中亦測量到高濃度的 2-MIB 以及產 2-MIB 藍綠菌，濃度最高達到 8×10^3 copies/mL，推測可能原因係因為於 106 年度 4~6 月期間台灣地區梅雨季節降雨情形不佳，同時該年於颱風季節時間延後，導致南勢溪流量嚴重不足，造成青潭堰內原水有長期滯留的現象，另因夏季氣溫高陽光曝曬後，原存在於底部底泥之產 2-MIB 藍綠菌大量孳生，釋放大量 2-MIB 進入水體中，因未有降雨的稀釋，使濃度快速累積而進入蓄水區內，因本處淨水場採用傳統混凝沉澱之淨水處理程序，對於 2-MIB 的去除效率不佳，進而產生出水的臭味問題。

表 5 青潭堰原水臭味物質採樣點濃度

採樣點 [○]	106 年 9 月藻類臭味物質(ng/L) [○]		107 年 10 月藻類臭味物質(ng/L) [○]		108 年 5 月藻類臭味物質(ng/L) [○]		108 年 8 月藻類臭味物質(ng/L) [○]		108 年 10 月藻類臭味物質(ng/L) [○]	
	2-MIB [○]	Geosmin [○]	2-MIB [○]	Geosmin [○]	2-MIB [○]	Geosmin [○]	2-MIB [○]	Geosmin [○]	2-MIB [○]	Geosmin [○]
③海會寺-水樣 [○]	10.5 [○]	3.8 [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]	8.2 [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]
③海會寺-底泥 [○]	172.3 [○]	— [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]	19.8 [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]
④直潭社區-水樣 [○]	19.1 [○]	4.5 [○]	ND [○]	ND [○]	3.3 [○]	7.7 [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]
④直潭社區-底泥 [○]	27.6 [○]	— [○]	ND [○]	ND [○]	10 [○]	12.7 [○]	43.1 [○]	2.5 [○]	— [○]	— [○]
⑤灣潭-水樣 [○]	13.8 [○]	4.0 [○]	ND [○]	ND [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]
⑤灣潭-底泥 [○]	4.9 [○]	— [○]	ND [○]	ND [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]
⑥青潭堰取水口-水樣 [○]	20.4 [○]	— [○]	ND [○]	ND [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]
⑥青潭堰取水口-底泥 [○]	8.1 [○]	— [○]	ND [○]	ND [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]	— [○]
⑦蘭溪匯流口-水樣 [○]	14.4 [○]	3.1 [○]	ND [○]	ND [○]	— [○]	— [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]
⑦蘭溪匯流口-底泥 [○]	276.2 [○]	— [○]	ND [○]	ND [○]	— [○]	— [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]	ND [○]

由 107 年 10 月份至 108 年 10 月份之採樣數據得知，108 年 5 月份曾經在直潭社區及海會寺附近採集到微量之 2-MIB 及 Geosmin，及 108 年 8 月份於直潭社區採集到超過嗅味閾值的 2-MIB(43ng/L)，推測可能該處為青潭堰水庫區中人口較密集之區域，有部分生活污水或農業活動之污水流入該區域水體，造成該區產出臭味物質之藻類滋生，使 2-MIB 的濃度較其他區域高；其餘地區皆未偵測出超過嗅味閾值的 2-MIB 及 Geosmin，經查 107 年及 108 年梅雨季節降雨情況良好，南勢溪流量大具有稀釋效果，因此並未有臭味問題產生，故於青潭堰水庫地區顯示水源區並非常態產生臭味物質污染水源，但因夏季偶有發生，仍須注意有機率發生。

(四)粉狀活性碳處理後水中 2-MIB 及 Geosmin 濃度分析

以新店溪青潭堰原水作為背景水，分別

配置 2 種不同濃度之 2-MIB(50、100ng/L)及 Geosmin(50、100ng/L)原水標準品，及 3 種不同材質來源之粉狀活性碳(C:褐煤、M: 木質、Y: 椰殼)，在不同濃度之粉狀活性碳添加(5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、25 mg/L)下，以杯瓶試驗機在 120rpm 下攪拌兩小時後過濾，以人工進行初嗅數實驗，曲線圖如圖 6 至圖 7 所示。

由圖 6 可看出，在濃度 50 ng/L 與 100ng/L 之 2-MIB 原水中分別添加 0 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、15 mg/L、20 mg/L、25 mg/L 之褐煤、木質、椰殼來源之粉狀活性碳攪拌 120 分鐘後，初嗅數皆隨著活性碳濃度提高而有下降的趨勢，且各種類之活性碳皆可於添加濃度 15 mg/L 時使初嗅數達到 1 以下(即測試人員已感測不出 2-MIB 的味道)，顯示雖 2-MIB 之起始濃度及初嗅強度不同，但最多只需添加至 15 mg/L 即可因應 2-MIB 之原水嗅度之問題。

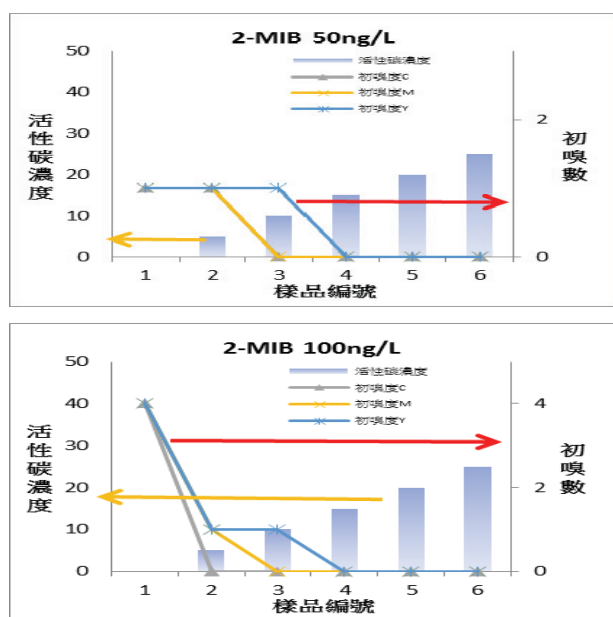


圖 6 添加粉狀活性碳劑量與 50ng/L、100ng/L 2-MIB 初嗅數圖

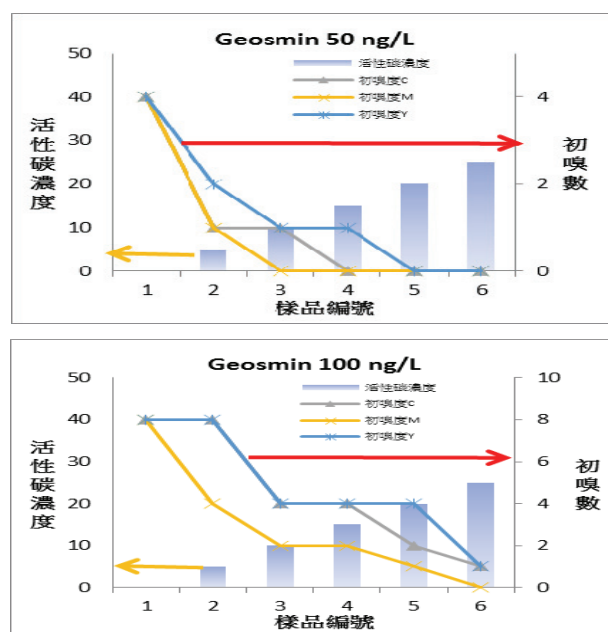


圖 7 粉狀活性碳添加劑量與添加 50ng/L、100 ng/L Geosmin 初嗅數圖

由圖 7 可看出，在濃度 50 ng/L 與 100ng/L 之 Geosmin 原水中分別添加 0 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、15 mg/L、20 mg/L、25 mg/L 之褐煤、木質、椰殼來源之粉狀活性碳攪拌 120 分鐘後，初嗅數皆隨著活性碳濃度提高而有下降的趨勢，各種類之活性碳於 Geosmin 初始濃度 100 ng/L 時，添加濃度 25 mg/L 時使初嗅數達到 1 以下，而當 Geosmin 初始濃度 50 ng/L 時，添加濃度 15 mg/L 時使初嗅數達到 1 以下，顯示當原水中出現較高濃度的 Geosmin 時，需使用較多的活性碳以降低清水中嗅覺強度，以便因應 Geosmin 之原水嗅度之問題。

以新店溪青潭堰原水作為背景水，分別配置 2 種不同濃度之 2-MIB (50、100ng/L) 及 Geosmin (50、100ng/L) 原水標準品，採用褐煤來源之粉狀活性碳，在不同濃度之粉狀活性碳添加(5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、25 mg/L) 下，SPME-GC/MS 分析 2-MIB / Geosmin 於原

水中之殘留濃度，並計算去除率，所產生的 2-MIB 及 Geosmin 去除效率曲線圖如圖 8 至圖 9 所示。

由圖 8 可看出在濃度 50 ng/L 之 2-MIB 原水中分別添加 5 mg/L、10 mg/L、15 mg/L、20 mg/L、25 mg/L 之粉狀活性碳攪拌 120 分鐘後，其去除率分別為 13%、34%、63%、90%、82%，由數據可得知隨著粉狀活性碳添加劑量增加時，對於 2-MIB 的吸附量亦隨之增加，去除率最高可達到 90%，但持續添加的粉狀活性碳並無法再有效降低 2-MIB 物質濃度；另同樣之情形對於較高濃度之 2-MIB 亦有相似的結果，由圖 8 可看出在濃度 100ng/L 之 2-MIB 原水中分別添加 5 mg/L、10 mg/L、15mg/L、20 mg/L、25 mg/L 之粉狀活性碳攪拌 120 分鐘後，其去除率分別為 40%、69%、80%、92%、95%，其對於 2-MIB 的去除率亦於 20 mg/L 達到 90% 以上。因此，若以青潭堰原水之 2-MIB 去除率

90%為例(起始濃度 100 ng/L，欲達臭味閾值 10 ng/L)，所需之最佳劑量約為 20 mg/L 之 PAC。

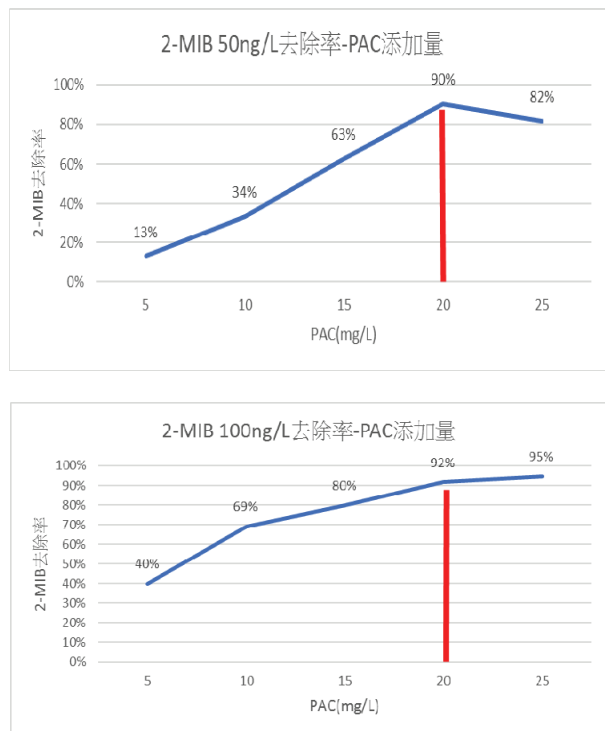


圖 8 粉狀活性碳添加劑量與添加 50ng/L 100ng/L 2-MIB 去除效率圖

圖 9 為 50 ng/L 之 Geosmin 原水中分別添加 5 mg/L、10 mg/L、15 mg/L、20 mg/L、25 mg/L 之粉狀活性碳攪拌 120 分鐘後測試 Geosmin 殘餘濃度，其去除率分別為 76%、89%、85%、88%、85%，由數據可得知隨著粉狀活性碳添加劑量增加時，對於 Geosmin 的吸附量差異不大，當添加 10mg/L 之粉狀活性碳即可達到約 89%之去除效率，持續增加粉狀活性碳劑量並無法再有效降低 Geosmin 物質濃度；另同樣之情形對於較高濃度之 Geosmin 亦有相似的結果，圖 9 為 100 ng/L 之 Geosmin 原水中分別添加 5 mg/L、10 mg/L、15 mg/L、20 mg/L、25 mg/L 之粉狀活性碳攪拌 120 分鐘後測試 Geosmin 殘餘濃

度，其去除率分別為 85%、93%、93%、92%、89%，其對於 Geosmin 的去除率亦於 10 mg/L 達到 93%，持續增加粉狀活性碳劑量並無法再有效降低 Geosmin 物質濃度。因此，若以青潭堰原水之 Geosmin 去除率 90%為例(起始濃度 100 ng/L，欲達臭味閾值 10 ng/L)，所需之最佳劑量約為 10 mg/L 之 PAC。

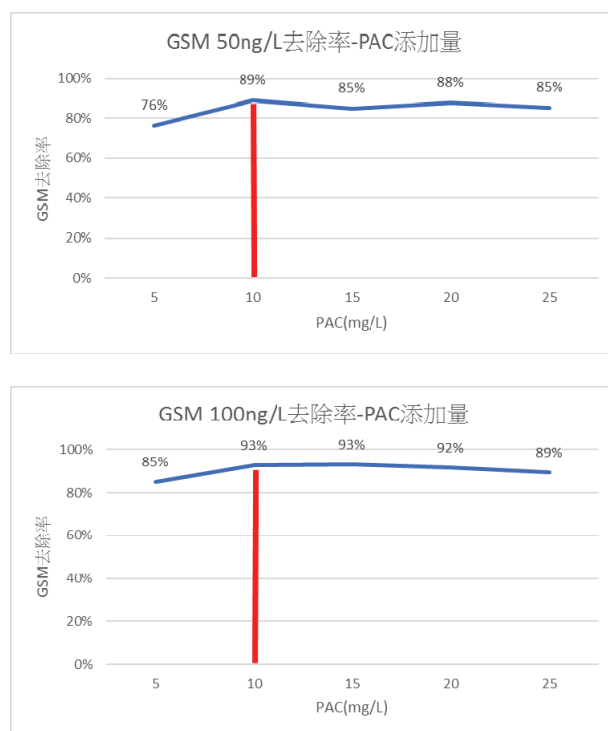


圖 9 粉狀活性碳添加劑量與添加 50ng/L 100ng/L Geosmin 去除效率圖

(五)粉狀活性碳瓶杯實驗吸附動力實驗

以新店溪青潭堰原水作為背景水，分別配置濃度約為 50 ng/L 之 2-MIB 及 Geosmin 原水標準品，及 3 種不同材質來源之粉狀活性碳(褐煤、椰殼、木質)，取含臭味標準品之原水添加粉狀活性碳 15 mg/L，以杯瓶試驗機在 120rpm 下攪拌，反應時間取青潭堰到分水井的平均歷時約 2 小時，分別於 15、30、60、90、120 分鐘時取樣過濾後，測量 2-MIB 及 Geosmin 之殘留濃度，並以去除率



及攪拌吸附時間作圖，曲線圖如圖 10~11 所示。

實驗結果，在原水中的 2-MIB 濃度約 50ng/L 時，各類活性碳對 2-MIB 的吸附主要發生在接觸時間的前 2 個小時內，接觸時間 15 分鐘，褐煤、木質、椰殼類活性碳對 2-MIB

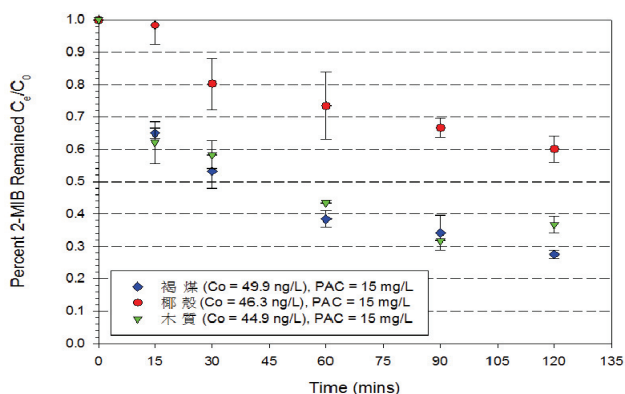


圖 10 不同型態 PAC 吸附青潭堰原水臭味標準品之 2-MIB 時間關係圖

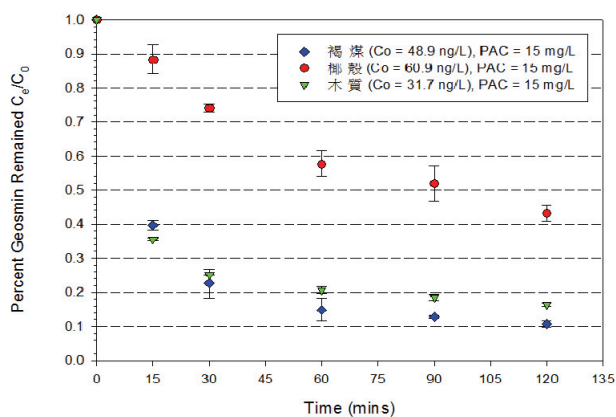


圖 11 不同型態 PAC 吸附青潭堰原水臭味標準品 Geosmin 時間關係圖

另一方面，當原水中 Geosmin 的濃度約 50ng/L 時，各類活性碳對 Geosmin 的吸附主要發生在接觸時間的前 2 個小時內，接觸時間 15 分鐘，褐煤、木質、椰殼類活性碳對 2-MIB 殘餘濃度分別為 40%、38%、88%，隨著時間的增加殘留濃度也逐漸下降，惟褐煤

及木質之活性碳效果皆相較椰殼活性碳效果佳，當接觸時間增加至 2 小時，褐煤、木質、椰殼類活性碳殘留濃度分別為 12%、17%、42%，顯示褐煤來源的活性碳效果在 120 分鐘時吸附效果最佳。

綜合上述動力吸附實驗結果得知，粉狀活性碳吸附能力為褐煤>木質>>椰殼，及粉狀活性碳瓶杯實驗初嗅數試驗，可得使用褐煤能有效去除水中的 Geosmin 和 2-MIB。

五、結論

從 Jar test 實驗可看出，PAC 劑量為 15 mg/L 時，不論 2-MIB 藍綠菌及 Geosmin 去除率均可達 90%去除率。粉狀活性碳瓶杯實驗去除試於 2-MIB 藍綠菌及 Geosmin 在 50~100ng/L 情況下，其去除率與活性碳劑量、接觸時間有關，與初始濃度無關。傳統凝膠凝程序無法有效去除水中臭味，而添加活性碳能有效去除水中 Geosmin 及 2-MIB。由於目前國內自來水廠處理程序絕大部分仍屬於傳統方法，對於水中造成土臭味的物質無法有效去除，以台灣目前多數水源土臭味問題的情況考慮，且在短時間內應無法投入大量經費全面建立臭氧活性碳或薄膜處理程序考慮，以粉狀活性碳技術去除有機性臭味(土臭味物質及化學性臭味)為可行且較經濟的處理方式。

參考文獻

1. Atasi, K.Z., Chen, T., Huddleston, J.I., Young, C.C., and Suffet, I.H. (1999) Factor screening for ozonating the taste-and odor-causing compounds in source water at Detroit, USA. Wat. Sci. Tech. Vol. 40, 115-122.

2. APHA, AWWA, and WPCF. (2000) Supplement to Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., Denver, Colorado, USA.
3. AWWA Water Quality Division Taste and Odor Committee (2002) Committee Report: Options for a Taste and Odor Standard, J. AWWA, 94, 80-87.
4. Marchesan, M. and Morran, J. (2002) Tastes associated with products in contact with drinking water, 6th IWA symposium on off-flavours in the aquatic environment.
5. Prediction of powdered activated carbon doses for 2-MIB removal in drinking water treatment using a simplified HSDM approach. (2007).
6. Effects of surface characteristics of activated carbon on the adsorption of 2-methylisobornel (MIB) and geosmin from natural water. (2016).
7. 高小萍、林財富 (1998) 水中異臭味物質 geosmin 及 2-MIB 分析技術之研究，第十六屆自來水研討會論文集，pp. 283-300。
8. 楊豐誠，林財富，劉家玲 (2001)。粉狀活性碳控制原水中臭味之研究：添加劑量及接觸時間之決定，第十八屆自來水研究發表會，中華民國自來水協會，宜蘭縣，pp. 179-193。
9. 楊豐誠 (2001) 應用粉狀活性碳去除原水中 2-MIB 之研究，國立成功大學環境工程系碩士論文。
10. 劉家玲 (2002) 預氯程序對粉狀活性碳吸附 2-MIB 之影響，國立成功大學環境工程系碩士論文。
11. 黃毓茹 (2003) 粉狀活性碳吸附原水中 Geosmin 與 2-MIB 之研究，國立成功大學環境工程系碩士論文。

作者簡介

魏旭毅先生

現職：臺北自來水事業處四級工程師

專長：淨水工程、自來水設備檢驗

曾俊華先生

現職：臺北自來水事業處三級工程師

專長：淨水處理、水質控制

蔡松恩先生

現職：臺北自來水事業處四級工程師

專長：淨水處理、水質檢驗

廖睿宏先生

現職：臺北自來水事業處四級工程師

專長：淨水處理、加氯加藥管理

李育輯先生

現職：臺北自來水事業處二級工程師

專長：淨水處理、污泥處理

水安全計畫的核心價值-持續確認有效性

文/游育晟、何承嶧、吳振榮

一、前言

安全飲用水是人類發展和福祉的根本，世界衛生組織(World Health Organization, WHO)不斷致力於提升公眾用水安全及品質，自 1984 年編撰發佈第 1 版飲用水水質準則 (Guidelines for Drinking-water Quality, GDWQ)，以保障公眾用水健康為出發點，針對微生物問題、化學問題、放射性問題及消毒等面向所帶來之健康危害風險，提出各項建議值，提供各國政府機關及供水機構參考。此外，國際水協(International Water Association, IWA)亦公布波昂安全飲用水憲章(Bonn Charter for Safe Drinking Water)，皆將水安全計畫納入，故受到全球各供水管理機構及督導機關重視。為了進一步確保飲用水安全，WHO 於 2004 年發佈第 3 版飲用水水質準則，引入風險評估及預防性管理措施之原則及概念，增加公眾對飲用水安全信心，並重視建立水安全框架，加強僅以依賴對供水端(淨水場出水及用戶)水質檢測來保證飲用水的安全性。藉由實施水安全計畫(Water Safety plans, WSPs)，整體充分考慮評估從集水區(及其水源)至消費者之間所有供水系統環節之風險評價，同時確認風險管理方式，包括確保控制措施之有效性，這種概念類似食品工業的危害分析重要管制點(Hazard Analysis and Critical Control Points, HACCP)。為了確保飲用水水質安全應承擔的責任，水

安全計畫應包括 3 個主要行動：

- (一)對供水系統評估，以確認範圍及有可能對系統產生影響的潛在風險，並了解供水水質能否符合基於健康目標的水質要求。
- (二)確定需要採取的控制措施，並對每一項控制措施進行有效的運行監測，以減少或消除危險風險因子，確保供水系統內多重安全屏障能有效發揮功能，水質能符合健康目標要求。
- (三)制定管理方案，說明供水系統在正常及緊急意外情況下採取相關適合行動及措施，並對於供水系統評估(包括更新和改善)、監測、協調溝通諮詢，和支援方案皆有明確書面規定。

水安全計畫的基本目標即是儘可能減少水源污染，並藉由淨水處理減少或去除污染物，同時防止在飲用水貯存、輸送及處理過程中造成之二次污染。

WHO 繼於 2009 年發佈水安全計畫手冊(Water Safety Plans Manual)作為各國推行水安全計畫實務最佳參考範例資料，將 WSPs 推行步驟分為 6 大項，包括：

- 1.準備階段(模組 1-初步行動、建立水安全計畫執行團隊)。
- 2.系統評估(模組 2-描述供水系統；模組 3-確定危害及風險評估；模組 4-確認控制措

施，風險再評估與排序；模組 5-開發、實施及維護改善升級計畫)。

3.運行監控(模組 6-詳細說明對控制措施的監控；模組 7-確認水安全計畫的有效性。

4.管理交流(模組 8-準備管理方案；模組 9-開發支援性計畫)。

5.回饋(模組 10-計畫與實施水安全計畫的階段性評價；模組 11-緊急意外事故後檢討水安全計畫)。

6.升級與改善。

台水公司為提升出水安全，達成「集水區至消費者」之通盤檢討以降低危害風險，爰參考上述飲用水水質準則(GDWQ)、波昂安全飲用水憲章及水安全計畫手冊，並考量台水公司各單位皆有與水質安全管理相關之規定，惟皆獨立作業，無綜整跨單位水安全相關事務及進行整體水安全系統管理及評估，故導入 WSPs 精神，訂定「台灣自來水股份有限公司水安全計畫推動要點」，期許藉由具體 WSPs 實施步驟，讓各執行單位有所依據，並透過團體腦力激盪(Brainstorming Technique)方式逐步推動。有關淨水場「水安全風險值」之評估計算方式，採用(1)水質異常風險、(2)客訴風險及(3)危害事件風險等 3 面向風險相加求得總風險值，各面向資料所擷取資料以完整一年為原則，其中(1)水質異常風險參考台水公司水質預警系統(Alarm Data Transfer System, ADTS)產出淨水場「合格率報表」之超內控水質項目及超內控比例，再以表 1 分別轉換為「嚴

重度風險分數」及「異常頻率權重」後相乘計算求得風險值；(2)客訴風險參考「台水 1910」客服申訴系統之「水質客訴類別」及「申訴件數」，再以表 2 分別轉換為「客訴風險分數」及「異常比率權重」後相乘計算求得風險值；(3)危害事件風險則採取半定量矩陣方式，由過往及潛在可能發生之危害事件，考量每年發生頻率及影響程度，依表 3 分別轉換為「危害風險分數」及「嚴重度權重」後相乘計算求得風險值。

台水公司已於 2018 年 11 月擇定第七區管理處坪頂淨水場作為試辦標的，成立水安全計畫團隊，召開「水安全計畫評估會議」，透過完整供水系統風險鑑定及評估，建立水質確保技術、污染源管制、控制措施及監測機制，達成全時水安全目標。經於 2018 年 8 月 1 日至 2019 年 1 月 31 日辦理相關改善策略後，並比較改善前後該場總風險值由 47 分已有效降低為 32 分，其中水質異常風險由 36 分降低為 21 分，詳如表 4 所示，主要為混合清水鋁內控達成率大幅提高(由 58.3 %提升至 100%)，顯示藉由反沖洗程序改善，提昇快濾池效能，可有效控制濾後水濁度，並進一步改善水中顆粒鋁及總鋁含量。另試辦期間，發現該場快濾池濁度計有管線阻塞問題，經洽廠商疏通及重新施作後，已改善濁度計進水管流量，並建議後續應適時排水及檢討裝設位置及進流水方式及流速，加強各項參數之掌握度。



表 1 水質異常風險計算方式

水質檢項	嚴重度 風險分數	相乘	內控 達成率	異常比率權 重
水源		×	95-99.99%	1
(1)採各水源進場混合後水源(依飲用水水源水質標準)				
大腸桿菌群、氨氮、TOC、COD	3			
砷等六種重金屬	5			
淨水場			80-94.99%	2
(2)採各淨水處理單元處理後水質-清水池(依飲用水水質標準)				
(3)採各期淨水處理流程混合後清水水質(依飲用水水質標準)				
濁度	1			
色度、自由有效餘氯、氫離子濃度指數	2			
臭度	3			
細菌性標準	3			
影響適飲性、感官物質	3			
可能影響健康物質	4			
影響健康物質	5			
(4)採回收廢水水質(依放流水標準)			60-79.99%	3
(5)採放流廢水水質(依放流水標準)				
懸浮固體量、總餘氯、COD、pH 等廢水檢項	1			
配水			<60%	4
(6)採配水系統飲用水水質(依飲用水水質標準)-檢項比照清水				
其他				
曾遭受環保局開罰或新聞事件之檢項	5			
微囊藻毒或其他生物性毒性測試	5			

表 2 客訴風險計算方式

客訴分類	客訴 風險 分數	相乘	申訴件 數	異常比 率權重
用戶端	水黃濁有泥沙、水白濁、水裡有異物(三類件數相加計算)	×	0 件	0
	其他		1-2 件	1
	氣味過重			
	硬度(鍋垢)		3-12 件	2
	水黏膩感			
	水有顏色		13-52 件	3
	水有異味			
	重大申訴事件(如媒體新聞事件、環保受罰案件等)		>52 件	4

表 3 事件危害風險計算方式

事件危害風險			
發生頻率(每年)		嚴重度	
很少/極少發生(<1 次)	1	無可見影響	1
不太可能(1-2 次)	2	輕微影響	2
可能(3-12 次)	3	中等影響	3
很可能(13-52 次)	4	嚴重影響	4
常發生(>52 次)	5	災難性	5

此外，該場加強不同水源間之水量調配，其清水總硬度亦有相當程度改善(由 42.6 %提升至 66.7%)，惟後續仍有超內控標準風險，建議評估增設結晶軟化設備之必要性及可能性。有關客訴風險，雖改善前後水質客訴案件占比由 0.67%降至 0.55%，有漸減趨勢，惟風險值無差異(11 分)，故仍需持續改

善淨水操作、加強混凝劑加藥量及加氯量控制，並加強與用戶聯繫溝通方能有所成效。

表 4 坪頂淨水場試辦計畫改善前後風險比較

	水質異常 風險分數	客訴 風險分數	分數 總計
試辦前	混合清水鋁 58.3% (12 分)。	其他 2 件(1 分)。	47 分
	清水池總硬度 42.6%(12 分)。	泥沙+白濁+異物共 6 件(2 分)。	
	混合清水總硬度 50%(12 分)。	氯味過重 1 件 (2 分)。	
		水有異味 5 件 (6 分)。	
試辦後	混合清水濁度 66.7%(3 分)。	其他 2 件(1 分)。	32 分
	混合清水總溶解固體量 66.7%(9 分)。	泥沙+白濁+異物共 6 件(2 分)。	
	混合清水總硬度 66.7%(9 分)。	氯味過重 1 件 (2 分)。	
		水有異味 5 件 (6 分)。	

二、持續確認有效性

為確認水安全計畫的有效性(模組 7)，辦理淨水場後續歸納整理與驗證工作，確認淨水場控制措施完整有效性，並持續採循環式品質管理(Plan-Do-Check-Act, PDCA)滾動檢討，依 WHO 建議定期評估下列項目：(1)確認所有重要危害及危害事件、(2)包含所有可能的危害及危害事件的控制措施、(3)建立適當的監控程序、(4)確定所有可能的淨水操作限制值及臨界值、(5)確認改善措施已被納入追蹤控管、(6)建立適當之監測驗證程序。

其中驗證(Verification)是對飲用水供水系統總體安全性的最後查核，除了對供水系統集水區(水源)、淨水場、配水管網及消費者(用戶)各部分運行進行監測外，還須進行最終驗證，以確保水安全計畫能正常執行。驗證工作包含(1)監測是否遵守水安全計畫

及符合水質法規標準 (Compliance monitoring)；(2)進行內部及外部稽核以獨立及系統化確認水安全計畫之完整性、執行情形以及是否即時更新 (Auditing)；(3)確認顧客滿意度(Consumer Satisfaction)，如圖 1 所示，為水安全計畫的有效性提供相關證據，並確保能夠滿足基於健康目標的水質要求。

台水公司目前除透過「台水 1910」客服申訴系統了解用戶滿意度與處理客訴問題。

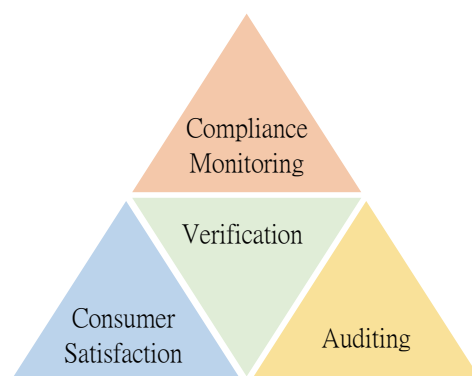


圖 1 確認水安全計畫有效性核心行動

另為掌握水源水質符合「飲用水水源水質標準」及確保自來水品質符合「飲用水水質標準」，台水公司訂定「水質檢驗規範」，定期檢驗各水庫、地下及地面水源，與轄屬各淨水場原水、清水及配水管網水質，以加強水質管理，確保水質安全。在稽核部分，因現階段屬水安全計畫導入初期，故採非正式內部稽核方式，每半年邀請總處及區管理處內部專業技術人員，透過實場訪查來確認淨水場水安全計畫有效性，並提供相關改善建議。

三、坪頂場辦理情形

台水公司分別於 2019 年 5 月 24 日及 11 月 29 日至坪頂淨水場辦理 2 次內部稽核，第一次稽核區間為 2018 年 11 月 1 日至 2019 年



4 月 30 日；第二次稽核區間為 2019 年 5 月 1 日至 10 月 31 日。比較 2 次稽核之風險分數，如表 5 所示，水質異常風險分數由 36 分大幅降為 14 分，其主要為清水「鋁殘留過高」、「濁度偏高」、「總溶解固體量偏高」及「總硬度過高」等 4 項改善所致。惟新增原水「大腸桿菌群」及回收廢水「懸浮固體量偏高」，進一步了解後，為上游短期降雨逕流造成進入原水大腸桿菌群偏高，研判屬於偶發事件。而坪頂場現有廢水處理設備不足，致清理膠羽沉澱池底泥期間，廢水濁度及處理量過高，造成回收廢水之懸浮固體量偏高。客訴風險分數由 4 分略降為 3 分，改善項目為「氯味過重」、「水黃濁有泥沙、水白濁、水裡有異物」；增加項目為「水黏膩感」，經實地拜訪了解，主因為用戶水塔過大且維護不當所致。

坪頂場已陸續完成 3 號、5 號及 6 號膠凝沉澱池底泥清理及故障修復；快濾池完成 2 座出水蝶閥及 5 座排水閥門驅動機維修、10 座排水閘門電動驅動機更換與 2 座排水閘門固定座鬆動維護，如表 6 所示，針對該場各處理單元出水水質，膠羽沉澱池出水濁度雖超出內控值 5 NTU，惟出水濁度已逐漸降低，顯示故障之膠凝沉澱池恢復正常運轉後，已減輕整體膠羽沉澱池操作負荷。另抽查 2 號及 7 號快濾池，發現 7 號池第 2 次驗證出水濁度 1.95 NTU，已超出內控值 0.5 NTU，該池反沖洗頻率每 49 小時 1 次，顯示過濾效能不佳，經常反洗，建議儘早更換濾砂，同時 7 號快濾池濁度計 2 次顯示值與實測值誤差皆超出要求小於 25%，建議濁度計維護商保養時加強維護校正。該場東清水池

及西清水池出水總溶解固體量及總硬度含量皆符合飲用水水質標準，惟因久未降雨，濃度已逐漸升高，建議持續追蹤。此外，西清水池 2 次驗證總鋁皆超出內控值 0.10 mg/L，建議進一步了解西清水池顆粒鋁及溶解鋁含量，以評估後續改善方式。

表 5 第一次及第二次稽核之風險分數比較

危害	第一次稽核	第二次稽核
水質異常風險分數(內控達成率)		
鋁殘留過高	清水池 4.0% (12 分)	清水池內 80.0% (6 分)
濁度偏高	混合清水 66.7% (3 分)	混合清水 100% (0 分)
總溶解固體量偏高	混合清水 66.7% (9 分)	混合清水 100% (0 分)
總硬度過高	清水池 100% (0 分) 混合清水 33.3% (12 分)	清水池 100% (0 分) 混合清水 100% (0 分)
大腸桿菌群偏高	原水 100% (0 分)	原水 88.9% (6 分)
懸浮固體量偏高	回收廢水 100% (0 分)	回收廢水 87.5% (2 分)
小計	36	14
客訴風險分數		
氯味過重	氯味過重 2 件 (2 分)	氯味過重 0 件 (0 分)
水黃濁有泥沙、水白濁、水裡有異物	水黃濁有泥沙 1 件 +水白濁 4 件+水有異物 1 件，共 6 件 (2 分)	水黃濁有泥沙 1 件 +水白濁 1 件，共 2 件(1 分)
水黏膩感	水黏膩感 0 件 (0 分)	水黏膩感 1 件 (2 分)
小計	4	3
總計	40	17

表 6 第一次及第二次稽核水質異常風險執行情形

危害	控制措施	第一次稽核	第二次稽核	後續作為
鋁殘留過高	1. 持續進行膠凝沉澱池效能提升及故障修復。 2. 持續進行快濾池效能提升及故障修復。	1. 西清水池總鋁 0.142 mg/L，超出內控值 0.10 mg/L。 2. 膠凝沉澱池故障修復情形： 5 號池已修復恢復正常運作(共 6 座正常出水)，惟 3 號及 7 號池因扭力異常，致刮泥機停機，為避免影響供水，將待 6 號及 8 號池修復後再辦理 3 號及 7 號池污泥清理工作。 3. 快濾池故障修復情形： (1) 辦理電動閘門檢修維護。 (2) 依電動閘門檢修單價契約，2019 年完成換修 2 座出水蝶閥、5 台排水閘門驅動機維修及 2 座排水閘門固定座鬆動維護。 (3) 預計 2019 年底更換 10 台排水閘門驅動機及 3 座排水閘門。 (4) 預定辦理 10 座快濾池增換補砂，預算書已於 2019 年 4 月送區管理處核辦。	1. 東清水池總鋁 0.048 mg/L、西清水池 0.103 mg/L，已超出內控值 0.10 mg/L。 2. 膠凝沉澱池故障修復情形： (1) 2019 年 9、10 月分別完成 6 號池及 3 號池底泥清理及故障修復，運轉出水。 (2) 2019 年 10 月底完成 8 號池混凝桶凹陷復原，預計 2020 年 1 月前修復刮泥設備。 (3) 考量淨水處理負荷，常態維持 7 座膠凝沉澱池運轉，預計 2020 年 1 月再進行 7 號池清理作業。 3. 快濾池反洗或故障修復情形： (1) 完成 10 座排水閘門電動驅動機更換，3 座排水閘門進行汰換施工中，預定 2019 年底完成更換。 (2) 因 2019 年度預算不足，10 座快濾池增換補砂已改編列 2020 年度預算，預計 2020 年底前完成。	1. 進一步了解西清水池顆粒鋁及溶解鋁含量，以評估後續改善方式。 2. 持續進行膠凝沉澱池效能提升及故障修復。 3. 持續進行快濾池效能提升及故障修復。
濁度偏高	1. 建議濁度計應適時排水、檢討裝設位置及進流水方式及流速。 2. 持續進行膠凝沉澱池效能提升及故障修復。 3. 持續進行快濾池效能提升及故障修復。	1. 舊場膠凝沉澱池出水濁度：除 6 號及 8 號池故障待修復外，其餘 1 號~5 號池及 8 號池出水濁度介於 10~14.4 NTU，雖仍超出內控值 5 NTU，惟較 2018 年 11 月 8~9 日比對資料稍微降低，且因近期集水區豪大雨致原水濁度偏高，顯示增加 5 號池運作，可減輕整體操作負荷。 2. 舊場快濾池出水濁度：抽查 2 號池 0.47 NTU 及 7 號池 0.41 NTU，皆符合內控值 0.5 NTU。 3. 抽查 7 號快濾池濁度計顯示 0.087 NTU；實測 0.41 NTU，誤差超出要求 25%。 4. 2019 年 5 月 24 日清水濁度 0.36 NTU，符合內控值 0.50 NTU。 5. 確認膠凝沉澱池故障修復情形：同上。 6. 確認快濾池反洗或故障修復情形：同上。	1. 舊場膠凝沉澱池出水濁度：除 8 號池故障待修復外，1 號~7 號池出水濁度介於 6.29~14.6 NTU，雖仍超出內控值 5 NTU，惟較前次 2019 年 5 月 24 日查驗結果大幅降低，顯示 6 號池修復後，已有效降低其他膠凝沉澱池操作負荷。 2. 舊場快濾池出水濁度：抽查 2 號池 0.17 NTU、7 號池 1.95 NTU，7 號池已超出內控值 0.5 NTU，查 7 號池反沖洗頻率每 49 小時 1 次，顯示過濾效能不佳，建議儘早更換該池濾砂。 3. 抽查 2 號快濾池顯示 0.173 NTU；實測 0.17 NTU；7 號快濾池顯示 0.976 NTU；實測 1.95 NTU，誤差 49.95%，超出要求 25%。 4. 東清水池 0.119 NTU、西清水池 0.398 NTU，皆符合內控值 0.50 NTU。 5. 確認膠凝沉澱池故障修復情形：同上。 6. 確認快濾池反洗或故障修復情形：同上。 7. 溪埔抽水站(伏流水)已完工，預計 2019 年 12 月 20 日出水，抽水量可達 15 萬 CMD，預估可減緩原水濁度。	1. 請濁度計維護廠商於下次保養時加強 7 號快濾池濁度計維護校正。 2. 適時進行監測儀器排水、檢討裝設位置及進流水方式及流速。 3. 持續進行膠凝沉澱池效能提升及故障修復。 4. 持續進行快濾池效能提升及故障修復。



危害	控制措施	第一次稽核	第二次稽核	後續作為
總溶解固體量偏高	整體評估各原水來源總溶解固體量狀況，加強水量調配	1. 竹寮抽水站 300 mg/L、高屏溪攔河堰 261 mg/L、西清水池 266mg/L、東清水池 276 mg/L，主因為近期連續降雨，原水水中總溶解固體量濃度稀釋降低。 2. 原水來源調配比例推估：高屏溪攔河堰取水量 25,816 CMD、南化水庫取水量 418,614 CMD、竹寮抽水站取水量 106,200 CMD。	1. 竹寮抽水站 350.4 mg/L、高屏溪攔河堰 401.9 mg/L、西清水池 407.6 mg/L、東清水池 348.6 mg/L，尚符合飲用水水質標準，惟較上一季檢測數據有上升趨勢。 2. 原水來源調配比例：高屏溪攔河堰 438,300 CMD、南化水庫 0 CMD、竹寮抽水站 107,655 CMD，總處理量約 54.6 萬 CMD，目前南化水庫有效蓄水量：7491.15 萬立方公尺，預測剩餘天數：60 天以上，因水利署限制水庫出水，故水源現為高屏溪攔河堰。	持續追蹤原水及清水總溶解固體量。
總硬度過高	整體評估各原水來源總硬度狀況，加強水量調配	1. 總硬度內控達成率提高(清水池達成率 42.6%→66.7%；混合清水 50%→100%) 2. 評估增設結晶軟化設備之必要性及可能性：因坪頂淨水場內用地已飽和，無空間再增設結晶軟化等相關設備，建議由南化水庫水源支援摻配之時間增加，以減少水中總溶解固體量及總硬度，另溪埔抽水站(伏流水)預定於 2019 年底完工，抽水量可達 15 萬 CMD，預估可再減緩水質問題。	1. 竹寮抽水站 292 mg/L、高屏溪攔河堰 272 mg/L、西清水池 268 mg/L、東清水池 232 mg/L，因近期久未降雨，原水總硬度濃度持續上升，尚符合飲用水水質標準。 2. 溪埔抽水站(伏流水)已完工，預計 2019 年 12 月 20 日出水，惟查 2019 年 9 月 17 日總硬度為 260 mg/L，改善坪頂場總硬度效果有限，故仍建議評估增設薄膜處理設備或結晶軟化設備之可能性。	持續追蹤原水及清水總硬度濃度。
大腸桿菌群偏高	(上階段無事件)	(上階段無事件)	查該事件為 2019 年 7 月 2 日原水採樣期間，推測因前一日上游短期降雨逕流造成原水大腸桿菌偏高，研判屬於偶發事件。	持續追蹤原水大腸桿菌群濃度是否有常態超內控或是上升趨勢。
懸浮固體量偏高	(上階段無事件)	(上階段無事件)	因現有廢水處理設備不足，致清理膠羽沉澱池底泥期間，因廢水濁度及處理量過高，造成回收水之懸浮固體量偏高。	請加強清理期間與承商之協調與配合，並持續追蹤回收廢水懸浮固體量濃度。

表 7 第一次及第二次稽核客訴風險執行情形

危害	控制措施	第一次稽核	第二次稽核
氯味過重	加強混凝劑加藥量及加氯量控制。	執行情形	執行情形
		(1)2018 年 12 月 24 日用戶反映近三天直接進水處有消毒水的味道和黑色屑屑，鄰居狀況不清楚。 (2)2019 年 1 月 22 日用戶表示剛剛發現直接進水口水質氯味過重，鄰居狀況相同。	確認淨水場及配水自由有效餘氯濃度：2019 年 11 月 29 日前加氯量控制總沉澱池約 0.69 mg/L、後加氯量控制清水池約 0.80 mg/L、遠端配水點(高雄市仁武區仁林路 269-1 號) 0.52 mg/L，符合台公司內控值範圍(0.3 mg/L~0.9 mg/L)。
		後續作為	後續作為
		因屬個人感觀問題，已與用戶聯繫並解釋情況後，用戶已可接受，後續將加強淨水處理加氯量控制。	1. 針對客訴氯味過重情形，應反饋至「淨水場」瞭解加氯量至配水管網分布情形，尤其掌握餘氯減少後最高及最低自由有效餘氯濃度是否符合法規範圍要求。 2. 針對反應氯味過重之用戶，應再次主動追蹤用戶感受，了解用戶滿意度。
水有異物	(非屬台水公司權責)	執行情形	後續作為
		2018 年 12 月 9 日 1999 轉接民眾反映直接進水水質有異物，未加熱前呈現透明結晶狀。經過保溫 75 度後會膨脹變長條狀。附近民眾皆有此情形。	針對非屬台水公司供水之民眾，建議可適時提供台水公司自來水用水設備新裝相關資料，供民眾參考。
		後續作為	
		經現場及圖資勘查該處為簡易自來水非台水公司權責地區。	
客訴白濁	同上總硬度控制措施	執行情形	執行情形
		(1)2018 年 12 月 13 日 1999 轉接民眾反映水有白濁狀況，且有較重消毒水味，靜置一段時間後仍未改善；(2)2018 年 12 月 14 日用戶來電反映目前直接水源呈灰白色，靜置後不會恢復清澈；(3)2018 年 12 月 26 日用戶反映自來水加熱後有白色的沉澱物及表層亦有白色漂浮物；(4)2019 年 3 月 2 日 1999 用戶反映近日常水煮沸後有白色汙垢。 因枯水期致原水中總硬度增加，水中氫碳酸鹽(俗稱暫時硬度)加熱後形成碳酸鈣固體沉澱，不會對健康有影響。已與用戶聯繫並解釋情況。	2019 年 10 月 18 日用戶表示今日分表進水處水質呈現白濁現象、臭水溝的味道且靜置後會浮一層油，已與用戶聯繫溝通。 主因為水中總硬度經煮沸後生成白色碳酸鈣水垢所致，已與用戶聯繫並解釋情況。另臭水溝味及靜置後會浮一層油為客服人員誤繕，應為消毒味。
		後續作為	後續作為
		將持續追蹤原水及清水總硬度濃度，評估淨水增設薄膜處理設備或結晶軟化設備之可能性。	有關水中總硬度所造成之水垢問題，參照前述總硬度控制措施。
客訴泥沙	加強管線工程及修漏廠商教育訓練(制水閥啟閉程序及排水濁度確	執行情形	執行情形
		2019 年 4 月 17 日用戶反映直接進水水質黃濁，鄰居狀況相同。	2019 年 8 月 19 日用戶反映每天直接進水會有砂石沉澱，已與用戶聯繫，主因為管線工程施工造成。
		後續作為	後續作為
		因查當日該場供水水質無異且鄰居亦有相同	將加強配水管線工程廠商教育訓練。



危害	控制措施	第一次稽核	第二次稽核
	認)	情形,故研判有可能為管線修漏時造成濁度物質進入配水管網所致,將加強配水修漏廠商教育訓練。	
水黏膩感	(上階段無事件)	(上階段無事件)	執行情形
			2019 年 8 月 2 日用戶來電反映目前住家自來水摸起來黏黏的(水塔間接用水 pH 值大於 8),8 月 6 日派員前往處理,並於直接用水檢測水質 pH 7.70,餘氯 0.45 mg/L,濁度 0.38 NTU,符合飲用水水質標準,並向用戶解釋 pH 值升高原因。
			後續作為 主因為用戶水塔過大且維護不當所致,將加強宣導。

有關「台水 1910」客訴部分,如表 7 所示,其中「氣味過重」情形,雖屬個人感觀問題,且第 2 次驗證時已無用戶反應,惟應反饋至淨水場瞭解加氯量至配水管網分布情形,尤其掌握餘氯減少後最高及最低自由有效餘氯濃度是否符合法規範圍要求,並建議再次主動追蹤用戶感受,了解用戶滿意度。另客訴「水白濁」問題,則因枯水期致原水中總硬度含量增加,造成加熱後形成碳酸鈣固體沉澱,建議持續追蹤總硬度含量,並評估淨水增設薄膜處理設備或結晶軟化設備之可能性。而客訴「水黃濁有泥沙」,研判有可能為管線修漏時造成濁度物質進入配水管網所致,建議針對制水閘啟閉程序及排水濁度確認,加強工程及修漏廠商教育訓練。

四、未來展望

為導入執行及驗證水安全計畫,台水公司總管理處、區管理處及廠所等各單位全員參與,透過定期召開水安全計畫評估會議及水安全計畫檢討會議,從集水區、淨水場、

配水管網至消費者,滾動檢討轄下淨水場風險狀況及改善策略,為供水安全把關,除坪頂淨水場外,12 個區管理處皆有一座示範淨水場,並自 2019 年 10 月起陸續召開第 1 次評估會議。另為協助各區管理處辦理水安全計畫,亦由吳副總經理振榮親自召集總處相關業管單位(資訊處、營業處、供水處、工務處、漏水防治處、人力資源處及水質處)召開「各區管理處水安全計畫第 1 次評估會議後檢討分工會議」討論分工辦理事項。台水公司未來將持續納入所有淨水場,並以總風險值趨近 0 為終極目標,以優質安全的飲用水贏得用戶信賴。

參考文獻

1. World Health Organization, "Guideline for Drinking-water Quality", 4th edition, 2011.
2. International Water Association, "The Bonn Charter for Safe Drinking Water", 2004.
3. World Health Organization, "Water Safety Plan Manual: Step-by-step risk management for drinking-water suppliers", 2009.
4. World Health Organization, "A practical guide to

Auditing water safety plans”, 2016.

5. World Health Organization, “A guide to equitable water safety planning: ensuring no one is left behind”, 2019.

6. 何承嶧、游育晟、陳威豪、陳乃菁、劉彥均、王冠中、楊昭端，台水公司水安全計畫-以坪頂淨水場為例，自來水協會會刊，第38卷第2期，第17-29頁，2019。

7. 何承嶧、駱尚廉，水質安全計畫之導入評估，自來水協會會刊，第34卷第3期，第50-70頁，2015。

作者簡介

游育晟 先生

現職：台灣自來水股份有限公司水質處工程師

專長：水質管理、水質檢驗及分析

何承嶧 先生

現職：台灣自來水股份有限公司水質處副處長

專長：自來水處理技術、水質管理、環境工程

吳振榮 先生

現職：台灣自來水股份有限公司副總經理

專長：自來水工程規劃設計及營運管理、自來水處理技術、水質管理

中華民國自來水協會會刊論文獎設置辦法

中華民國 105 年 8 月 26 日第十八屆第八次理監事聯席會議審議通過

一、目的

為鼓勵本會會員踴躍發表自來水學術研究及應用論文，以提升本會會刊研究水準，特設置本項獎勵辦法。

二、獎勵對象

就本會出版之一年四期「自來水」會刊論文中分「工程技術」、「營運管理」、「水質及其他」等類別，分別評定給獎論文，每類別以 2 篇為原則，每篇頒發獎狀及獎金各一份，獎狀得視作者人數增頒之。

三、獎勵金額

論文獎每篇頒發獎金新臺幣壹萬元整，金額得視本會財務狀況予調整之。

上項論文獎金及評獎作業經費由本會列入年度預算籌措撥充之。

四、評獎辦法

(一) 凡自上年度第二期以後至該年度第二期在本會「自來水」會刊登載之「每期專題」、「專門論著」、「實務研究」及「一般論述」論文，由編譯出版委員會於每年六月底前，每類別推薦 3-4 篇候選論文，再將該候選論文送請專家學者審查 (peer-review)，每篇論文審查人以兩人為原則。

(二) 本會編譯出版委員會主任委員於每年七月底前召集專家學者 5~7 人組成評獎委員會，就專家審查意見進行複評：

1. 評獎委員以無記名投票，每類別論文勾選至多 2 篇推薦文章，每篇以 1 分計算，取累計分數較高之論文，至多 2 篇，為該類給獎論文。

2. 同一類別如有多篇文章同分無法選取時，以同分中專家審查總分數高低排序，分數再相同，則由評獎委員以無記名投票方式決定。

(三) 選出給獎論文，報經本會理監事會議通過後公佈。

五、頒獎日期

於每年自來水節慶祝大會時頒發。

六、本辦法經由本會理監事會審議通過後實施，修訂時亦同。

淨水場微生物檢測方法比較與分析

文/李維旻、李貞慧

摘要

微生物為飲用水水質標準檢測項目之一，而指標性微生物－大腸桿菌群檢測方法隨科技發展日益更新。依行政院環境保護署環境檢驗所目前公告方法可分為三種：第一種方法為-多管發酵法，待測水樣置入液狀培養基中依產氣與否來判斷大腸桿菌群。第二種方法為-濾膜法，利用選擇性培養基不同，限制不同微生物族群的生長。第三種方法為-酵素呈色及螢光反應檢測法，利用大腸桿菌群具有水解半乳糖苷酶之能力並產生顏色變化加以判斷。

自民國 84 年認證環檢所水質檢測項目以來，台水公司一般使用濾膜法來進行大腸桿菌群檢測，惟考量淨水場事物繁忙、人員訓練較困難及檢測能量等因素，決定於 107 年下半年起將淨水場增加較簡易操作之水中大腸桿菌群及大腸桿菌檢測方法－酵素呈色及螢光反應檢測法。

施行至今已近 2 年時間，部分淨水場反應水源水質偶有偏高情事。因此，就目前現有檢驗資料來探討分析此兩種大腸桿菌群檢測方法（濾膜法及酵素呈色及螢光反應檢測法），兩方法檢測方式雖不盡相同，但其相關性相當高，各淨水場應可依其水源特性、檢測人力及經費各方面評估考量，選擇適用方法使用之。

關鍵字：大腸桿菌群、濾膜法、螢光酵素法

一、前言

近年來，因環保意識抬頭，民眾對飲用水需求及要求大幅提升，然依現實考量，若要檢測飲用水中每種微生物或病原菌是不太可行的，故目前各國對於飲用水微生物檢測項目傾向以檢測指標微生物為主。由於指標性微生物具有以下特性：分離及鑑定的技術簡便(便於檢測)、不會於水中生長(非水媒病菌，若為水媒病菌，則會藉由水當作媒介將病原菌傳染到環境或其他生物而導致疾病之發生，影響計數。)並且對消毒劑(有效氯等)具有較大的抵抗性(病菌無法於水中生長，但對消毒劑相對有抗性，則較其他生物，在水中存活較長時間)，因此如於水中檢測出相關指標性微生物，可藉此判斷水中具有該污染源。

飲用水之污染指標性微生物大致分為：糞便性污染指標(如大腸桿菌(*Escherichia Coli*)、糞便性大腸桿菌群(*Fecal coliform*)、糞便鏈球菌(*Fecal streptococci*)、梭狀芽孢桿菌(*Clostridium difficile*)等)、水源及其他污染指標(如：總菌落數(*Heterotrophic plate count* (HPC))、大腸桿菌群(*Coliform group*)、假單胞菌屬(*Pseudomonas sp.*)等)及水媒致病微生物(如：沙門氏菌屬(*Salmonella sp.*)、志賀桿菌屬(*Shigella sp.*)、梨形鞭毛蟲(*Giardia lamblia*)、隱孢子蟲(*Cryptosporidium*)及痢疾阿米巴原蟲(*pathogenic amoeba*)等)等三類做為水處理及消毒之參考。因水媒致病微生物雖相對危

險但於非流行傳染期間，數量稀少，檢測不易，因此並未列入飲用水中微生物之例行檢測對象，而利用指標性微生物之有無取代是否具有各式致病微生物存在。

世界各國大致以大腸桿菌群作為指標微生物，惟近年來研究顯示大腸桿菌群並非糞便性污染之指標微生物，故常搭配糞便性大腸桿菌群或大腸桿菌之有無來判斷水體是否受到生物污染。

二、檢驗方法概述

依行政院環境保護署環境檢驗所公告分為多管發酵法、濾膜法及酵素呈色及螢光反應檢測法等三種。

(一)水中大腸桿菌群檢測方法－多管發酵法 multiple-tube fermentation (MTF) (NIEA E201.54B)，以下簡稱多管發酵法，為環保署於 97 年 3 月 15 日起實施。本方法係以檢測水中革蘭氏染色陰性，不產生內生孢子之桿狀好氧或兼性厭氧菌，且能在 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 培養 48 ± 3 小時發酵乳糖並產生酸及氣體之大腸桿菌群；在不同體積或不同稀釋度之水樣所產生之結果，以「100 mL 水中最大可能數 (MPN/100 mL)」表示 100 mL 水中存在之大腸桿菌群數目。試驗分 2 階段，首先進行推定試驗(使用 LST 培養)基，若結果為陽性反應(產生氣體或呈現混濁狀態)再進行確認試驗(使用 BGLB 培養基)，培養 48 ± 3 小時內產生氣體則顯示大腸桿菌群存在。

(二)飲用水中大腸桿菌群檢測方法－濾膜法 membrane filter (MF) (NIEA E230.55B)，

以下簡稱濾膜法，為環保署 106 年 6 月 15 日生效。本方法係用濾膜檢測飲用水中好氧或兼性厭氧、革蘭氏染色陰性、不產芽孢之大腸桿菌群細菌。大腸桿菌群在含有乳糖的 LES Endo agar(又名 m-Endo agar LES)培養基或含有 m-Endo broth 培養基吸收襯墊上，於 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 培養 24 ± 2 小時會產生具金屬光澤菌落。所有缺乏金屬光澤的菌落，均判定為非大腸桿菌群。另外因濾膜法易受濁度干擾，可根據歷史數據或水樣特性，水樣有濁度較高之狀況，或預期濾膜上之雜菌菌落數可能為金屬光澤菌落數的 10 倍以上，若水樣存在濁度過高或雜菌過多等干擾，除進行上述檢測步驟外，可另外過濾 10 mL 的原液及(或)各稀釋度水樣(檢測步驟及結果處理方式參考「NIEA E202」)。亦可將 100 mL 水樣以 2 張以上之濾膜過濾(如過濾 50 mL、50 mL)，培養後再將金屬光澤菌落數加總計算，以降低干擾；或以 NIEA E215 或 E231 方法另行檢測。

(三)水中大腸桿菌群及大腸桿菌檢測方法－酵素呈色及螢光反應檢測法 (NIEA E215.52C)，以下簡稱螢光酵素法，為環保署 97 年 3 月 15 日起實施。本方法係在 100 mL 水樣中加入 Colilert®-18 培養基，混搖均勻使之完全溶解，分裝至試管或定量盤。於 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 培養 18 至 22 小時後，計算大腸桿菌群陽性之孔數，再查表求取 100 mL 水樣中最大可能數 (most probable number，簡稱 MPN)。方法原理是培養基內含兩種色原

(chromogen)，其中一種為 ONPG (Ortho-nitrophenyl- β -D-galactopyranoside)，可被半乳糖苷酶 (β -D-galactosidase) 水解呈現黃色；另外一種為 MUG (4-methylumbelliferyl- β -D-glucuronide)，可被尿苷酸化酶 (β -glucuronidase) 水解，在波長 365 nm 之紫外光照射之下產生螢光。大腸桿菌群細菌能產生半乳糖苷酶，因此培養後會形成黃色。大腸桿菌則同時具有半乳糖苷酶及尿苷酸化酶，培養後不但會呈現黃色，且在波長 365nm 之紫外光照射下會產生螢光。

三、檢測方法分析比較

(一)大腸桿菌群生長：

- 1.考研究資料顯示：部分大腸桿菌群遭受非致死傷害時僅為暫時失去活性，本身仍有基礎代謝功能。雖可能無法利用含有乳糖之培養基成長使細胞再生長，但仍能利用核酸及蛋白質合成，活性膜泵控制和酶的活性來檢測。(例如利用半乳糖苷酶及尿苷酸化酶將 ONPG 及 MUG 水解呈色)
- 2.另外針對加氯處理的水樣，微生物有時僅受損傷卻未死亡。以 LES Endo agar 培養基而言，健康的大腸桿菌群在其上生長率達 93%，受創的大腸桿菌群則只有 66%，而受創的大腸桿菌群在液狀培養基，生長率為 56-72%，依培養時間有所差異。且多管發酵法、螢光酵素法所得數值概率統計值，濾膜法則是實際計數菌落而得，每一菌落為單一細菌經培養長成。一般而言多管發酵法、螢光酵素法檢驗出的大腸桿菌群的分析值應較濾膜法高。

(二)方法的使用及限制：

- 1.受限於選擇性培養基成分或其中所含雜質的關係於菌類初期培養階段，可能會有抑制作用。(例如：MLSB 培養基中所還有酚紅的成分可能造成因氯受損之菌類回收率降低的原因)
- 2.透過膜過濾所造成壓力或濾膜格線亦有可能抑制菌類生長或導致菌落分布異常等現象。(例如：菌落光澤差，膜壓不均勻導致有疏水部分，膜不符貼於培養基表面產生菌落無法生長等)
- 3.水樣濁度亦會導致濾膜阻塞，其沉積物可能會干擾菌類成長。可參考環檢所濾膜法中針對濁度問題之備註。
- 4.熱帶與亞熱帶水體中有機物含量較高，故與溫帶水體比較其總菌數的含量以前者較多，研究資料亦顯示在含有較高非目標微生物之水樣中大腸桿菌在選擇性培養基上菌落金屬光澤之生成會受到抑制，造成偽陽性及偽陰性問題，產生錯誤的判斷。

(三)大腸桿菌群之定義：

由於檢測方法不同，定義之大腸桿菌群亦有所不同，(多管發酵法所檢測之大腸桿菌群為革蘭氏陰性菌，不產生內生孢子之桿狀好氧或兼性厭氧菌，並能發酵乳糖及產酸產氣之菌屬；濾膜法所檢測之大腸桿菌群為革蘭氏染色陰性、不產芽孢之大腸桿菌群且於含有乳糖之 m-Endo agar 中生長成含有金屬光澤菌落；螢光酵素法所檢測出大腸桿菌群則為將 Colilert®-18 培養基中 ONPG 色原水解呈現黃色者)。一般大腸桿菌群分類可依分子生物學方式，針對不同檢測方法

之限定因子來判讀。(詳表 1)

表 1 不同方法定義的大腸桿菌群(臚列至菌屬)

多管發酵法 培養基 LST/ BGLB	濾膜法 培 養 基 m-Endo/ LES	螢光酵素法 培 養 基 Colilert®-18
Escherichia sp.	Escherichia sp.	Escherichia sp.
Klebsiella sp.	Klebsiella sp.	Klebsiella sp.
Enterobacter sp.	Enterobacter sp.	Enterobacter sp.
Citrobacter sp.	Citrobacter sp.	Citrobacter sp.
等菌屬	Buttiauxella sp.	Buttiauxella sp.
	Cedecea sp.	Cedecea sp.
	Cronobacter sp.	Cronobacter sp.
	Hafnia sp.	Ewingella sp.
	Kluyvera sp.	Hafnia sp.
	Leclercia sp.	Kluyvera sp.
	Moelleralla sp.	Leclercia sp.
	Pantoea sp.	Moelleralla sp.
	Rahnella sp.	Pantoea sp.
	Serratia sp.	RahnellaIzard sp.
	Salmonell sp.	Rahnella sp.
	Yersinia sp.	Serratia sp.
	Yokenella sp.	Salmonella sp.
	等菌屬	Trabulsiella sp.
		Yersinia sp.
		等菌屬

(四)實驗檢測結果是否真實呈現(如表 2)

表 2 兩方法之偽陽性及偽陰性比較

檢測 方法	螢光酵素法 (Colilert®-18)		濾膜法 (m-Endo) 濾膜法 (Coliform Agar ES)	
	偽陽性	偽陰性	偽陽性	偽陰性
大腸桿菌 群	9.6%	6.3%	29%	-
大腸桿菌	4.35%	11.4%	11.3%	10.0%

(五)檢測時間及人力比較：

1.多管發酵法：台水公司自 84 年認證環檢所水中大腸桿菌群檢測方法-濾膜法以來，區處已陸續停止使用此方法。主要原因為，依據環檢所方法顯示，需進行推定及確認試驗，每階段所需時間約 48 小時，檢測時間長，缺乏時效性；且若根據美國公告方法 Method 9131(Total Coliform : Multiple tube fermentation technique)，則需經歷 3 個階段：推定試驗，確認試驗及完成試驗，耗時 1 周左右才完成檢驗工作。其次人力問題，每個水樣需使用 30 - 45 支玻璃管及產氣管，配置培養基及清洗實驗所需試管十分耗時，再者培養後廢棄物多，易產生環境污染等衍生問題。

2.濾膜法：濾膜法處理水樣所需時間，包含配置培養基、稀釋水樣、實驗操作步驟及後續滅菌時間等，約為 20 分鐘，培養時間為 24 小時±2 小時，對於濾膜上雜菌較多之水樣（雜菌及具金屬光澤菌落 <200 CFU/100mL 時，仍需計數），會產生菌類蔓生、金屬光澤較不明顯現象，須於燈光照射下調整角度，仔細觀察是否具金屬光澤或培養足夠時間才易觀察。

3.螢光酵素法：處理 1 水樣時間為 5 分鐘，需加入水樣使培養基混搖均勻，不用重複水樣，培養時間為 18 小時至 22 小時，分析時需比對比色盤（黃色），顏色較深者，則為陽性反應。另外若實驗室搭配 365nm 紫外光燈，可同時檢測大腸桿菌，判讀方式為培養後呈現黃色且於紫外光下產生螢光。

四、結果與討論

因各淨水場經淨水處理程序後，清水中大腸桿菌檢驗數據皆小於 1，以下為本次檢測各淨水場原水數據分析。

(一)新竹一場

新竹一場位於新竹市東區博愛街 1 號，水源為頭前溪(與新竹二場來源相同)及寬口井混合使用，由 108 年 3 月份至 11 月份每周採樣及檢驗數據顯示，濾膜法與螢光酵素法具高度相關性(R 值約 0.90)。濾膜法及螢光酵素法分別與濁度、導電度及水中總溶解固體量等因子皆無明顯相關(R 值均小於 0.5)。

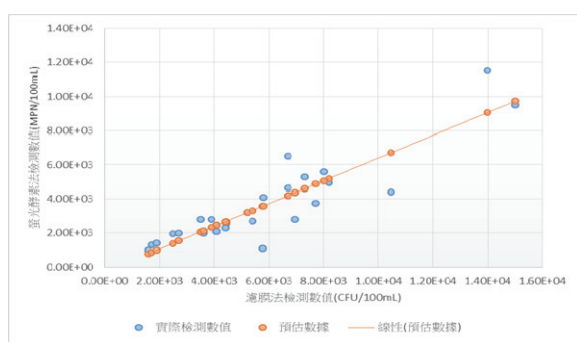


圖 1 新竹一場—濾膜法與螢光酵素法檢測結果

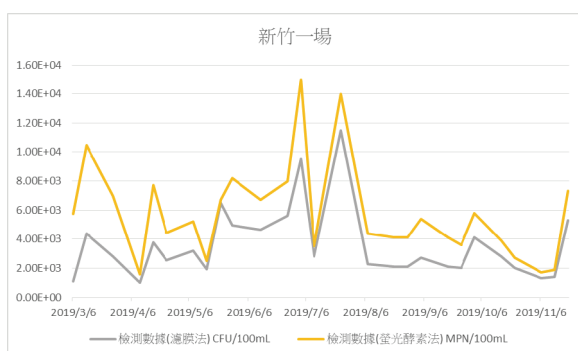


圖 2 新竹一場—濾膜法與螢光酵素法回歸趨勢圖

(二)新竹二場

新竹二場位於新竹市東區東美路 91 巷 14-42 號使用頭前溪(隆恩堰)水源，由 108 年 3 月份至 11 月份每周採樣及檢驗數據顯示，

濾膜法與螢光酵素法相關係數較高(R 值約 0.84)。濾膜法、螢光酵素法分別與濁度、導電度及水中總溶解固體量等因子皆無明顯相關(R 值均小於 0.6)。

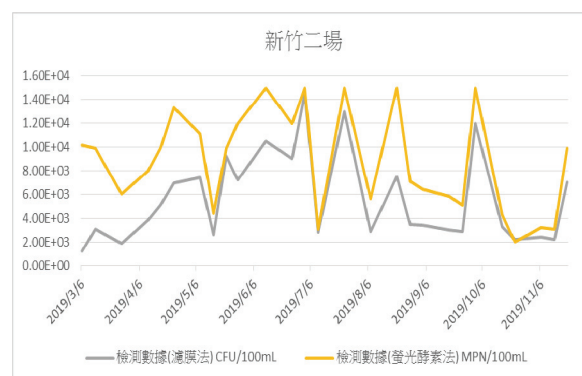


圖 3 新竹二場—濾膜法與螢光酵素法檢測結果

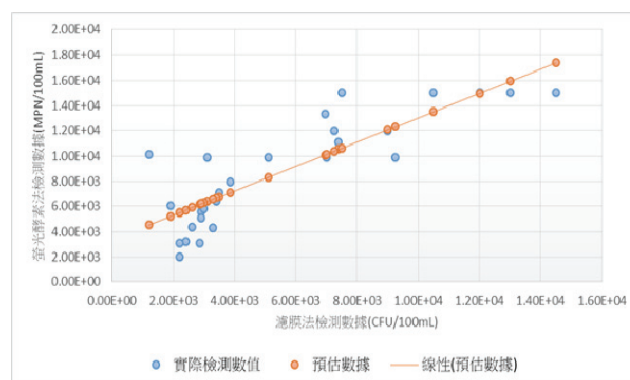


圖 4 新竹二場—濾膜法與螢光酵素法回歸趨勢圖

(三)豐原二場

豐原二場位於臺中市石岡區明德路 415 號，水源為大甲溪(石岡壩)及其支流食水料溪，由 108 年 3 月份至 9 月份每周採樣及檢驗數據顯示，濾膜法與螢光酵素法相關係數(R 值約 0.90)。濾膜法及螢光酵素法分別與濁度相關係數較高(R 值約 0.9)，推測可能原因為豐原二場場濁度變化較顯著的關係；另外其與導電度及水中總溶解固體量皆無明顯相關(R 值均小於 0.6)。

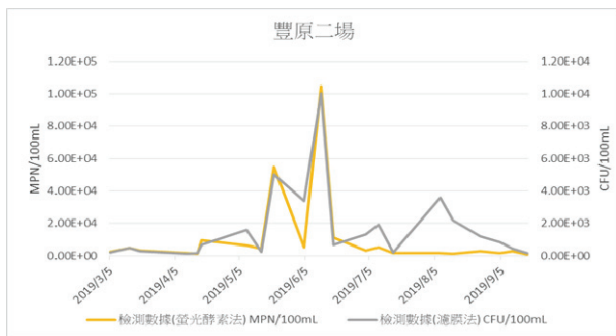


圖 5 豐原二場—濾膜法與螢光酵素法檢測結果

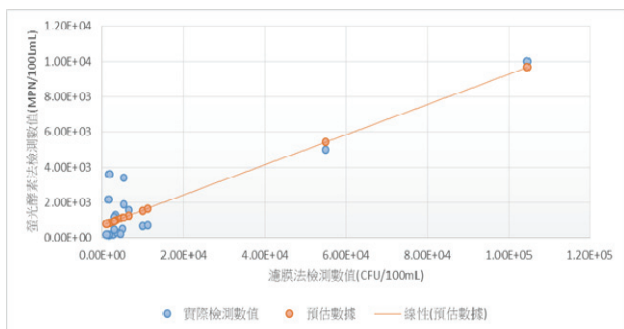


圖 6 豐原二場—濾膜法與螢光酵素法迴歸圖

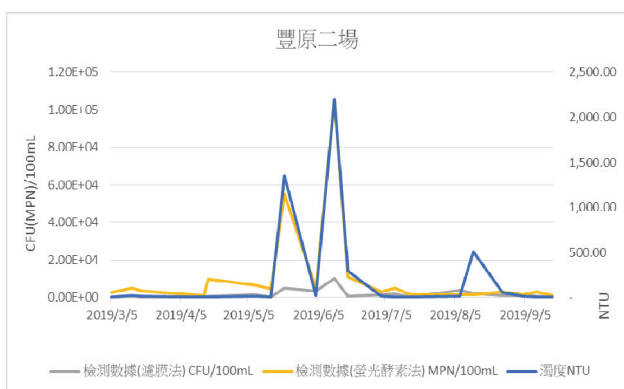


圖 7 豐原二場—濾膜法、螢光酵素法與濁度檢測結果(濾膜法與濁度之 R 值約為 0.89；螢光酵素法與濁度之 R 值約為 0.97)

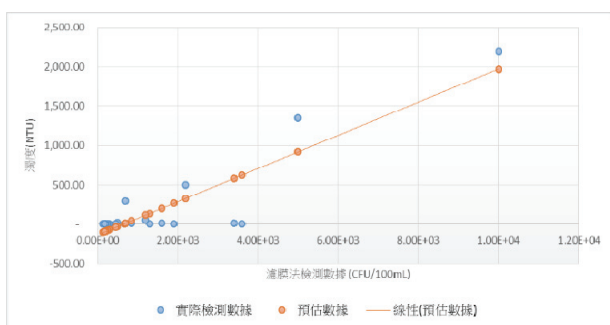


圖 8 豐原二場—濾膜法與濁度迴歸圖

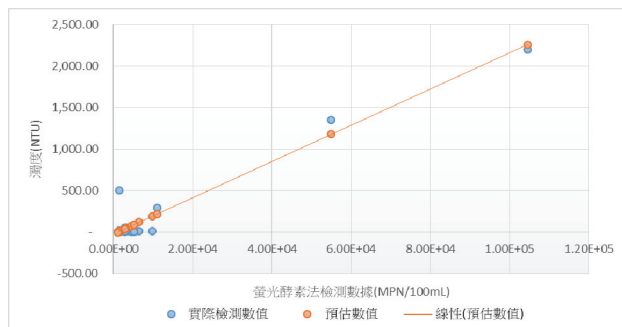


圖 9 豐原二場—螢光酵素法與濁度迴歸圖

(四)潭頂淨水場

潭頂淨水場位於台南縣新市鄉潭頂村 544 號，使用曾文、烏山頭水庫經嘉南大圳南幹線水源、曾文溪、菜寮溪溪水及山上場清水，由 108 年 3 月份至 9 月份採樣及檢驗數據顯示，濾膜法與螢光酵素法相關係數不高(R 值約 0.63)，且與其他相關因子(濁度、導電度及水中總溶解固體量)相關係數更低(R 值皆小於 0.5)，爰不另列圖示。

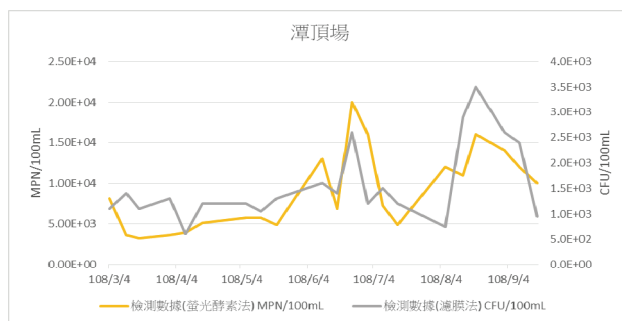


圖 10 潭頂場—濾膜法與螢光酵素法檢測結果

(五)鳳山淨水場

鳳山淨水場位於高雄市小港區坪頂里天池路 1 號，水源為高屏溪與東港溪，由 108 年 3 月份至 9 月份採樣及檢驗數據顯示，濾膜法與螢光酵素法相關係數高(R 值約 0.92)。惟濾膜法及螢光酵素法各別與濁度、導電度及水中總溶解固體量皆無明顯相關(R 值均小於 0.6)。

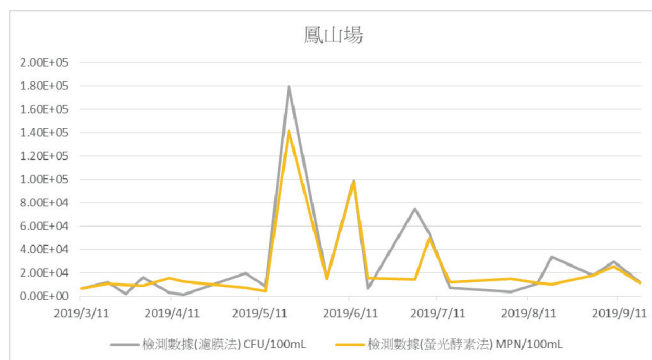


圖 11 鳳山場—濾膜法與螢光酵素法檢測結果

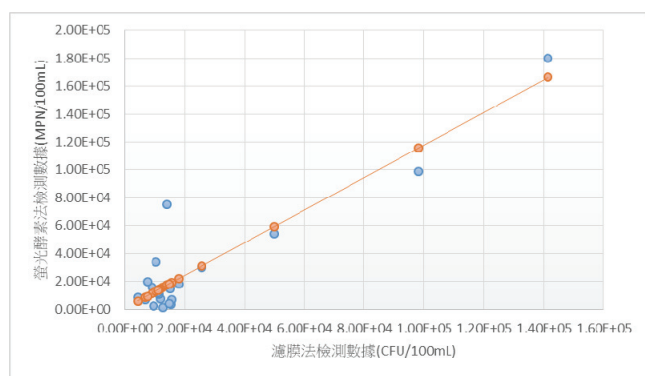


圖 12 鳳山場—濾膜法與螢光酵素法迴歸圖

五、結論與建議

- (一)新竹一場、新竹二場、豐原二場、潭頂場及鳳山場等淨水場清水水樣，利用濾膜法與螢光酵素法兩方法檢測大腸桿菌數據皆小於 1，結果有其一致性。
- (二)新竹一場、新竹二場、豐原二場、潭頂場及鳳山場等 5 座淨水場原水利用濾膜法與螢光酵素法進行大腸桿菌群檢驗之檢驗數據相關係數平均值為 0.796。其中新竹一場、新竹二場、豐原二場場及鳳山場四個淨水場之 R 值約可達 0.85 或更高，數據相關性相當高。
- (三)潭頂淨水場大腸桿菌群兩檢測方法 R 值為 0.632，較無相關性，推測原因為該場原水來源為曾文水庫及烏山頭水庫經嘉南大圳南幹線（農田水利會灌溉渠道）、

曾文溪、菜寮溪溪水及山上淨水場清水等較為多元，導致原水中菌類種類變化較劇烈，進而影響兩種大腸桿菌群檢驗方法之檢測數據。

- (四)分析結果僅豐原二場場檢測數據與濁度具相關性（R 值約 0.9），推測可能原因為該場濁度變化較劇烈，本次分析時間 3 月至 9 月間，原水濁度可由 3NTU 升至 2200NTU，故與兩檢測法趨勢較為一致。
- (五)使用濾膜法或螢光酵素法來檢測大腸桿菌群分別與導電度、水中總溶解固體等因子較無顯著相關。
- (六)台水公司自 84 年認證環檢所水中大腸桿菌群檢測方法-濾膜法以來，區處已陸續停止使用多管發酵法。主要原因為，依據環檢所方法顯示，多管發酵法需進行推定及確認試驗，每階段所需時間約 48 小時，檢測時間長，缺乏時效性；其次人力問題，每個水樣需使用 30 - 45 支玻璃管及產氣管，配置培養基及清洗實驗所需試管十分耗時；再者培養後廢棄物眾多，易產生環境污染等衍生問題。
- (七)檢驗大腸桿菌群所使用之濾膜法，前處理水樣時間約為 20 分鐘，培養時間為 24 小時±2 小時，然對於濾膜上雜菌較多之水樣因菌類蔓生、金屬光澤較不明顯等現象，不易觀察及計數。
- (八)107 年下半年新增之螢光酵素法前處理水樣時間約為 5 分鐘，僅需加入水樣使培養基混搖均勻，不用重複水樣，培養時間為 18 小時至 22 小時，判讀時呈色者，則為陽性反應。另外若實驗室搭配 365nm 紫外光燈，可同時檢測大腸桿菌，

判讀方式為培養後呈現黃色且於紫外光下產生螢光。

(九)綜合比較濾膜法與螢光酵素法兩方法，螢光酵素法檢驗方法較簡便，判斷方式易上手，可提供較無相關經驗者或初學者使用；濾膜法則可需考量使用人員專業性，具備完善訓練、價格之合理性等因素評估。依經濟考量，若檢驗量大、樣品數多，如目前區處水質課，建議使用濾膜法。若依環境因素及時效性考量，則建議使用螢光酵素法。

參考文獻

- 1.A review of new technologies for rapid coliform assay (Environment agency UK) R.Coales 2002
- 2.A comparison of the levels of faecal indicator bacteria in water and human faeces in a rural area of a tropical developing country (Sierra Leone) by R. C. WRIGHT Analytical Laboratory, Njala University College, P.M.B., Freetown, Sierra Leone 1982
- 3.Phenotypic and Phylogenetic Identification of Coliform Bacteria Obtained Using 12 Coliform Methods Approved by the U.S. Environmental Protection Agency (Applied and Environmental Microbiology) Ya Zhang,Pei-Ying Hong,Mark W. LeChevallier,Wen-Tso Liu 2015
- 4.MWH' s water treatment microbiological quality of water (WHO) 2012
- 5.Identification of the faecal indicator *Escherichia coli* in wastewater through the β -D-glucuronidase activity: comparison between two enumeration methods, membrane filtration with TBX agar, and Colilert®-18 (IWA journal of water &Health) P.209 – P.217 P. Vergine ;C. Salerno; E. Barca;G. Berardi;A. Pollice J Water Health 2017
- 6.Advances in the bacteriology of the coliform group : Their Suitability as Markers of Microbial Water Safety H. Leclerc , D. A. A. Mossel , S. C. Edberg , and C. B. Struijk 2001
- 7.Conditions favouring coliform & HPC bacterial growth in drinking-water and on water contact surfaces : M.W.LeChevallier 2003
- 8.Evaluation of Colilert-18 for Detection of Coliforms and *Escherichia coli* in Subtropical Freshwater : Kuo-Kuang Chao,¹ Chen-Ching Chao,² and Wei-Liang Chao 2003
- 9.Molecular Method for Detection of Total Coliforms in Drinking Water Samples : Andree F. Maheux 2014
- 10.飲用水水源及水質中致病性微生物管制之研究 行政院環保署委託研究案 趙維良 東吳大學微生物學系 2002
- 11.飲用水中的指標微生物「飲用水水質與處理」專輯-張怡怡 科學月刊1991年8月260期

作者簡介

李維旻 女士

現職：自來水公司水質處工程員

專長：水質管理、水質檢驗

李貞慧 女士

現職：自來水公司水質處組長

專長：水質管理、水質檢驗及分析

水中新興污染物—處理技術探討

文/張琰竣

一、前言

有鑑於新興污染物充斥於各種環境介質(水體、土壤及空氣等)，並與一般社會大眾日常生活息息相關，且隨著檢驗技術的進步而不斷出現，種類繁多，其存在飲用水中的濃度大多為檢測不出或極低濃度，惟對人體健康及生態環境的影響尚不明確或有爭議，其所造成之危害問題亦逐漸受到國際科學界重視與廣泛的關注。因此，對於新興污染物之種類及來源、對生物體之影響及處理技術等相關探討與研究之基本了解與認知實有其必要性，故本文蒐集整理相關研究報告及文獻，作簡單概要之敘述及說明，且著重在新興污染物工程處理技術方面的研究與探討，以供自來水及廢水處理等業界參考。

二、「新興污染物」是什麼？

2008 年美國環境保護署(US EPA)白皮書定義⁽¹⁾「新興污染物(Emerging Contaminants)泛指尚未納入飲用水標準之規範、在環境中還無法有效地被監測，及即使其以低濃度存在，仍可能會對生態環境或人體健康造成危害風險之污染物」。另美國地質調查局(United States Geological Survey, USGS)的定義⁽²⁾⁽³⁾「新興污染物 (Emerging Contaminants 或 Contaminants of Emerging Concern, CEC)為天然或合成的化學物質或微生物，過去在環境中未被監測或研究，惟有可能進入環境中，對生態或人體健康產生不良影響者」。

2010 年至 2013 年我國環境保護署曾委外進行篩選及評估飲用水中可能影響人體健康之新興污染物相關計畫，新興污染物主要為⁽⁴⁾「新認定或之前未確認」、「未受法規規範」、「且對人體健康及生態環境具有風險性」的化學污染物，其亦被稱為「新興關切污染物(CEC)」⁽⁵⁾⁽⁶⁾，「係指未被管制標準列管，在天然水體中因分析檢測技術的改善進步與毒性試驗的開發而被「發現」，且當其在環境中達一定濃度時，有潛在可能危害環境生態及水生生物之化學品和其他物質」。它們包括已存在於環境中，惟不一定是新化學品，近期内才被發現或評估其存在和重要性的污染物，亦引起關注健康風險等相關資訊，後來法規亦陸續增列管制。

新興污染物之共同特質為⁽⁴⁾「法規尚未規範或規範不全」、「傳統都市污水處理廠無法處理」及「對人體健康與生態之潛在危害性既深且遠」。

三、新興污染物之來源

新興污染物通常經由人類活動（包括工商業、農業、醫療場所、製藥廠，甚至一般家庭生活等）所產生且不易於環境中分解。雖經廢水處理廠處理後才排放於自然環境中，因其殘留的污染物(不能完全被去除與分解)或經環境轉化之潛在危害物質可能在水源、河川及海洋或其他環境中，進而影響生物體或人體健康。其可能來源包括家戶或個人不當的藥物棄置（如把藥物倒入馬桶或

洗手台)或濫用及毒品;食品添加劑;消費性日常用品溶出物;農業、畜牧、養殖、製藥、化學工業與高科技產業等排放污染物;醫院廢水;飲用水及廢水消毒副產物及微生物等⁽⁷⁾。

四、新興污染物之種類

新興污染物所涵蓋的範圍非常廣泛,舉凡新興的環境污染物、食品添加物與污染物、濫用藥物與毒品,及存在各式物品內之化學物種等,其種類繁多,可說是五花八門,不勝枚舉,以下僅摘要列舉 9 項主要常見新興污染物種類⁽⁷⁾,說明如下:

- (一)藥物及個人保健用品(Pharmaceuticals and Personal Care Products, PPCPs):如抗生素、類固醇、抗菌消毒劑、鎮痛劑及解熱劑等。
- (二)內分泌干擾物質(Endocrine Disrupting Compounds, EDCs):如戴奧辛、有機氯殺蟲劑、多氯聯苯(PCBs)、壬基酚(NP)、雙酚 A(BPA)及雌激素等。
- (三)生活日用品:如塑膠製品含有塑化劑(鄰苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)、防曬劑含有二苯甲酮等。
- (四)新興食品污染物:如三聚氰胺、孔雀綠、防腐劑、色素、人工甘味及農藥等。
- (五)釋放於環境中各式奈米物質:如奈米銀、奈米碳管等。
- (六)全氟化物:如防水抗污材料含有全氟辛酸(PFOA)及全氟辛磺酸鹽(PFOS)等。
- (七)飲用水及廢水消毒副產物:如亞硝基二甲基胺(N-Nitrosodimethylamine, NDMA)、醛類及鹵乙酸等。

(八)微生物:如梨形鞭毛蟲、隱孢子蟲、微囊藻毒及糞便性大腸桿菌群等。

(九)其他工業用化學物質:如阻燃劑及電材料含多溴二苯醚(PBDEs)等。

五、新興污染物之影響

由於新興污染物種類繁多,其對人體健康影響不盡相同,無法一一詳細列舉,以下僅簡單舉出說明普遍且重要之影響。

目前全球科學家已開始重視新興污染物的研究,雖尚無法確切證實其會對人體造成立即危險,惟在食物鏈的作用下,著實令人擔憂,好比藥物與個人保健用品(如抗生素、針劑及藥水等)人造化學物質存在著內分泌干擾物質(環境荷爾蒙),其化學結構(非常類似天然荷爾蒙)可模擬生物體內天然荷爾蒙,不易藉由傳統的廢棄物或廢污水設備去除或降低濃度,因其可透過空氣、水、土壤或食物鏈等途徑再返回生物體內,改變分泌荷爾蒙濃度,進而影響生理調節機能、生長、發育及生殖等作用。其不單會降低成年個體免疫力,引發甲狀腺癌,亦會影響生育能力,提高男性攝護腺癌、女性乳癌、子宮內膜異位症等發生機率。其中針對幼兒影響甚巨,不僅會影響其生殖系統發育及性別的表現,更會影響其中樞神經系統發展,導致學習能力低落、無法集中注意力等嚴重問題,不可不慎⁽⁷⁾。

另經動物實驗證實,若長期暴露於含「全氟烷酸類」化學物質(如工業用表面處理防水防油化學物質、鐵氟龍用品、不織布、地毯,家俱及殺蟲劑等)環境下,會影響實驗動物之免疫系統,亦會對肝臟產生有害及不良影響,嚴重者可能會致癌⁽⁷⁾。

六、新興污染物之處理技術

近幾年來已有學者專家陸續研究發現處理新興污染物之技術及新興處理技術，本文將著重在研究與探討一般較為熟悉且常見而重要的5種新興污染物工程處理技術及方法，並分別從淨水及廢水處理方面摘要整理說明如下：

新興污染物可能對生態系統及人體健康具有潛在威脅，因此成為人體健康與環境生態之隱憂。近數十年來，在全球對水資源需求及使用量增加下，水回收再利用已因應成為潮流，故亦相對提高對於回收水水質的要求，惟目前現有都市生活污水處理設施及淨水場淨水處理單元幾乎無法完全有效去除新興污染物（如藥物及環境荷爾蒙等），其對飲用水水質之影響亦持續逐漸廣受重視，且在環境水體中已可普遍檢測到這些微量有機物質成份，因此亟需了解其在環境水體存在狀況，及評估其對飲用水水源、環境生態或民眾健康等之影響，再採取適當的技術因應處理。

已有文獻顯示⁽⁵⁾淨水場原水中亦發現存在一些新興污染物，特別是使用地表水為水源且其原水遭受廢污水污染時。一般傳統淨水場(混凝/膠凝、沈澱、過濾及消毒)設計並未針對去除新興污染物特別設計處理單元，惟亦有文獻顯示⁽²⁾其可去除部分新興污染物，如多溴二苯醚(Polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)易附著於固體粒子之化學特性，則易於沉澱及過濾程序中被去除。

考量新興污染物之特性為種類多、濃度低，文獻彙整結果顯示⁽⁵⁾無法以單一處理單元去除所有微量新興污染物質；高級氧化處理對新興污染物雖有良好處理效果，惟宜先

評估其處理成本。目前較可行綜合性控制處理技術應為結合薄膜逆滲透（reverse osmosis, RO）/奈米過濾(nano-filtration, NF)及活性碳吸附單元。

傳統廢水處理方法若結合高級處理技術對於新興污染物有較佳去除效率⁽⁵⁾。高級處理程序中最有效處理技術為薄膜逆滲透(RO)，其次為O₃/UV 程序、粒狀活性碳吸附，再其次為加氯消毒。另高級氧化程序(advanced oxidation processes, AOPs)主要將臭氧(O₃)、過氧化氫(H₂O₂)及紫外光(UV)等單元結合運用，如O₃/UV、H₂O₂/UV程序等，因其所產生之氫氧自由基(OH·)為一不具選擇性的氧化劑，且具很高反應性，故AOPs可去除大部分EDCs及其他新興污染物⁽⁸⁾。

以下參考2010年US EPA針對7大類(如表1分類方式)16種新興污染物在淨水場實場系統中常用的處理技術⁽⁵⁾⁽⁹⁾，及文獻中有關傳統廢水處理方法結合高級處理技術等分別加以評估說明：

表 1 US EPA 評估淨水處理對新興污染物去除效能之分類方式⁽⁵⁾⁽⁹⁾

項次	主要物種	分類
1	壬基酚(Nonylphenols)、辛基酚(octylphenol) 及烷基酚聚氧乙稀醚類化合物(alkylphenol ethoxylate compounds, APEs)	NP/APEs
2	多環芳香族碳氫化合物(Paromatic hydrocarbons)	PAH
3	多溴聯苯醚(Polybrominated biphenyl ethers)	PBDEs
4	農藥(Pesticide)	Pesticide
5	藥物及個人保健用品(Pharmaceuticals)	PPCPs
6	類固醇及荷爾蒙(Steroids and Hormones)	S/H
7	其他類(Other)	Other

(一)薄膜逆滲透 (RO)

薄膜過濾處理程序⁽⁵⁾依其去除之污染物大小區分為微過濾(MF)、超過濾(UF)、奈米過濾(NF)及逆滲透膜(RO)等4種。其中微過濾(MF)及超過濾(UF)利用膜孔徑與微粒尺寸不同之篩選機制移除懸浮或膠狀微粒，奈米過濾(NF)及逆滲透膜(RO)則可移除一些溶解性污染物。Snyder⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾針對淨水單元處理新興污染物研究指出MF及UF對一些新興污染物之去除效果並不高，須採NF或RO方能提高處理效果。另有研究指出⁽²⁾⁽¹¹⁾傳統淨水處理程序無法去除全氟辛酸(Perfluorooctanic acid, PFOA) 及 全 氟 辛 烷 磺 酸 鹽 Perfluorooctanosulfonate, PFOS)，因氟與碳之強鍵結及低揮發性，NF及RO已證明可有效去除水中全氟碳化物。凝膠凝僅能去除小於40%之PPCPs 化合物；實驗室規模研究已證明RO及NF對去除PPCPs非常有效⁽²⁾⁽¹³⁾。以淨水處理而言，對於以RO處理自來水中之新興污染物仍較缺乏實場數據，惟有很多研究指出使用RO/NF僅能去除某些特定目標污染物⁽⁵⁾。

在廢水處理系統，RO 及 NF 對於大部分新興污染物及所有內分泌干擾活性物質(EDCs)均可有效地處理⁽⁸⁾。藉由 RO 薄膜降低水中無機離子及有機化合物的濃度有極佳效果⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾。薄膜系統幾乎可完全去除低分子量有機化合物，如 Heberer⁽⁸⁾⁽¹⁵⁾指出經 RO 處理後之水樣幾乎偵測不到藥物活性化合物及其他有機污染物的濃度。Ladenburger et al.⁽⁸⁾⁽¹⁶⁾研究亦指出睪丸素及雌素酮被去除至低於偵測極限的濃度，且幾乎可完全去除王基酚

(Nonylphenol, NP)及 4-octylphenol(OP)。

(二)臭氧(O₃)消毒

臭氧(O₃)消毒氧化力強，為強氧化劑與消毒劑，可直接氧化新興污染物，在高pH 時與新興污染物進行高級氧化作用(與水作用產生高反應性的氫氧自由基)，其亦被用於去活化水及廢水中的病原體。加入過氧化氫(H₂O₂)或紫外光(UV)亦可提高臭氧氧化反應性⁽⁵⁾。

以淨水處理而言，Snyder等⁽⁵⁾以臭氧(O₃)處理20種原水中常見新興污染物之效果良好，對不同物質之去除率多達50%以上。Westerhoff 等⁽⁵⁾使用臭氧劑量1 - 8mg/L，接觸3 - 5分鐘處理效果比氯化處理更佳。惟O₃對黃體素(progesterone)、睪固酮(testosterone)、點普羅胺(iopromide)、酮麝香(musk ketone)、眠爾通(meprobamate)及磷酸三(β-氯乙基)酯(tris(β-chloroethyl)-phosphate, TCEP)等化合物之處理效果較低⁽⁵⁾。

另外，2014 年 Oluwadara 等人⁽²⁾研究指出於 pH=8.25 時，使用 O₃ 去除雙酚 A(Bisphenol A, BPA)可達 81.13%去除率。

在廢水處理系統，Snyder et al.⁽⁸⁾⁽¹⁷⁾指出臭氧(O₃)消毒可去除多數 PPCPs (如 clofibric acid(降血脂藥劑)、diclofenac 及 carbamazepine)，另亦可去除 17 β-Estradiol (E2)、17 α-Ethynylestradiol(EE2)及雌三醇等。

(三)紫外光(UV)消毒

紫外光(UV)之氧化效能依光線能量及波長而定，水的澄清度和新興污染物種類等均會有影響，對於有機物分子化學鍵，利用適當的紫外光波長可使其斷鍵，亦可與水分

子反應產生高反應性的氫氧自由基，再與有機分子反應進行高級氧化作用，此過程亦能氧化及轉換水及廢水中之新興污染物分子。添加過氧化氫 (H_2O_2) 可增加氫氧自由基濃度而加強紫外線之氧化效能⁽⁵⁾。

淨水處理系統，針對 16 種新興污染物研究指出⁽⁵⁾其處理效率介於 5.3% (三氯磷酸鹽, Trichlorethyl phosphate) 至 83% (新諾明, Sulfamethoxazole) 之間。Snyder 等人⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾研究指出以 UV 劑量 $1,000\text{mJ}/\text{cm}^2$ 以上可處理新興污染物，添加 H_2O_2 可進一步提高 UV 氧化對各種污染物之處理效率。

在廢水處理系統，紫外光(UV)消毒對 EDCs 及 PPCPs 具良好去除效果，其去除率好壞則取決於 UV 消毒之光照劑量強度高低。若將臭氧及紫外光(O_3 /UV)消毒處理技術結合，可去除許多新興污染物⁽⁸⁾。

(四)粒狀活性碳(GAC)吸附

活性碳吸附因其在實場上操作經驗豐富及相對價廉等優點被廣泛使用在水處理方面，常用之形式可分為粒狀(GAC)或粉狀(PAC)等。淨水處理系統常用之處理單元為粒狀活性碳(GAC)吸附，其可填充在管柱中形成固定吸附床，於待處理之水體通過活性碳濾床時被吸附而將之去除；其處理步驟之成本經濟又非常有效，通常可去除低濃度的疏水性有機污染物，故針對低濃度新興污染物採用活性碳處理之效果良好⁽⁵⁾。

淨水處理中活性碳單元對新興污染物之處理數據極為有限，針對以GAC吸附去除16種新興污染物之處理效能而言，其處理效率介於45% (碘普羅胺, Iopromide) 至75% (二乙基間甲苯胺, DEET) 之間⁽⁵⁾。

另外，水中壬基酚(Nonylphenol, NP)可以GAC或AOPs去除。2001年Tanghe研究指出GAC可吸附量達 $100\text{mg}/\text{g}$ ，推估實場利用粒狀活性碳床可去除至 $10\mu\text{g}/\text{L}$ ⁽²⁾。US EPA文件⁽²⁾指出飲用水中使用GAC去除鄰苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(Di(2-ethylhexyl)phthalate, DEHP)為最佳處理技術，另亦有研究指出薄膜過濾(包括NF、UF及RO)去除率可達97.6%~99%。

在廢水處理系統，欲去除廢水中三氯蔗糖(Sucralose)及胺基(amine)高分子助凝劑前驅物，可採用粒狀活性碳(GAC)及粉狀活性碳(PAC)，惟PolyDADMAC 導致者則不具效用⁽²⁾。Ternes et al.⁽⁸⁾⁽¹⁸⁾研究指出當降低水樣通過GAC濾材的流速時，可完全去除clofibric acid。Ladenburger et al.⁽⁸⁾⁽¹⁶⁾研究指出若以加入少量活性碳於二級處理的放流水中來去除EDCs的方式，係為一最佳之效率/成本方法。惟De Rudder et al.⁽⁸⁾⁽¹⁹⁾則發現當環境中EDCs 濃度介於 $0.1\text{--}20\text{ ng}/\text{L}$ 時，GAC僅能吸附EDCs中少量 $17\alpha\text{-Ethinylestradiol(EE2)}$ 。

(五)加氯消毒（氧化作用）

加氯消毒在淨水及廢水處理中主要將病原微生物去活化。淨水程序之加氯消毒通常採用氯氣或次氯酸鈉溶液，以避免於配水管網內滋生微生物，確保飲用水安全。

以淨水處理而言，依美國環保署(US EPA)調查結果顯示⁽⁵⁾，傳統淨水處理程序中混凝、沈澱及過濾單元對於溶解性新興污染物之去除效果不佳，主要去除機制為加氯作用之化學氧化。加氯消毒中針對16種新興污染物處理效率介於11%(加樂麝香, Galaxolide) 至69%(新諾明, Sulfamethoxazole) 之間，其

對新興污染物之處理效果取決於污染物化學特性及氯的劑量⁽⁵⁾。Westerhoff⁽⁵⁾研究指出於 1 - 6 mg/L 加氯量，24 小時後殘留餘氯為 1 mg/L，對大部分芳香族新興污染物，加氯消毒去除效率可達 90% 以上，惟對含羧基結構物質等卻可能小於 20%。

另外，2010 年 Mosteo 等人⁽²⁾研究指出淨水處理前氯可完全氧化壬基酚(NP)，最佳高級氧化法為 O_3/H_2O_2 ，平均氧化率 55%，結合後氯可完全氧化。亦有研究指出⁽²⁾淨水程序若採用後氯胺(Chloramine)消毒者，接觸自由餘氯時間愈久，則亞硝基二甲基胺(N-Nitrosodimethylamine，NDMA)產生量愈低。

廢水處理系統亦使用氯來消毒經生物處理後之廢水，尤其於廢水再利用前，或加氯後的廢水排入河川前亦會加氯處理來進行消毒，避免廢污水排放影響水生生態系統⁽⁵⁾。加氯消毒程序中之自由餘氯(次氯酸HOCl及次氯酸根OCl)僅能與某些特定PPCPs及EDCs產生化學反應。加氯消毒除使微生物去活化外，亦可氧化及氯化作用氧化或轉換水中有機物，惟氯和有機物質反應可能產生三鹵甲烷及其他潛在有害的消毒副產物。經實驗發現，自由餘氯可使某些含有胺類物質的抗生素、diclofenac及咖啡因等產生轉化現象，並能有效降低整體之雌激素活性⁽⁸⁾。

七、結論與建議

環境中存在之各種環境荷爾蒙及新興污染物包含許多不同之化學物質，並與一般大眾之日常生活密切相關。隨著國人生活形態改變，生活中接觸、沾染或使用各種藥物

的機會也大幅增加，加以濫用藥物的社會新聞層出不窮，顯示一般個人照護醫藥用品及濫用藥物等相關問題已不容忽視，故須及時瞭解新興污染物種類及來源、對生物體可能之影響與採用適合的工程相關處理技術及緊急應變方式等，廣續進行監測及評估作業，隨時關心國內外研究最新進展，做好充分準備，所謂「無恃其不來，恃吾有以待也」，俾能減少新興污染物對環境的衝擊，並有效確保民眾用水安全，共同努力朝向「污染減量，永續經營」目標邁進。

參考文獻

1. EPA, U. S., White Paper Aquatic Life Criteria for Contaminants of Emerging Concern Part I General Challenges and Recommendations. 2008.
2. 薛志宏，新興污染物與飲用水，中華民國自來水協會會刊，第36卷，第3期，第30-38頁，2017年8月。
3. Contaminants of emerging concern in water, 2013, Water Researchs Research Center, The University of Arizona。
4. 林正芳、林郁真、余宗賢，新興污染物(抗生素與止痛藥)於特定污染源環境之流佈，2008年持久性有機污染物(含戴奧辛)研討會，第2頁，2008年9月。
5. 王根樹等，「飲用水水源與水質中新興污染物對人體健康風險評估之研究計畫(3/4)」期末報告，行政院環境保護署，第11-28頁，2012年12月。
6. 周佩欣，環境中新興污染物之檢測與探索，土木水利，第44卷，第6期，第27-29頁，2017年12月。
7. 台北好水電子報，「嚴格把關新興污染物，台北好水喝得好安心」，臺北自來水事業處，第

- 14期，2014年11月。
- 8.林郁真，論環境中之新興污染物，環境工程會刊，第39-55頁，2007年6月。
 - 9.US EPA. 2010. Treating Contaminants of Emerging Concern -A Review Database.
<http://water.epa.gov/scitech/swguidance/ppcp/results.cfm>
 - 10.Snyder SA, Adham S, Redding AM, Cannon FS, DeCarolis J, Oppenheimer J, Wert EC, Yoon Y. 2007. Desalination, 202:156
 - 11.Treatment mitigation strategies for Poly- and Perfluoroalkyl Substances,2016,Water Research Foundation。
 - 12.Pharmaceuticals in drinking water,2011,World Health Organization。
 - 13.Pharmaceuticals and personal care products in drinking water and aquatic environments -Answers to frequently asked questions, 2010, Environmental fact sheet,New Hampshire department of environmental services。
 - 14.Takashi Asano, “Wastewater Reclamation and Reuse,” Vol. 10, Water Quality Management Library, CRC Press, 1998.
 - 15.T. Herberer, “Tracking persistent pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water,” *Journal of Hydrology*, Vol.266,2002, pp. 175-189
 - 16.S.J. Ladenburger, J.E. Drewes, J. Hemming, J. Schauer, and W. Sonzongi, “Endocrine disrupting activity changes in water reclamation systems,” Proceedings of the 20Pth P Annual WaterReuse Symposium: WaterReuse and desalination: mile High opportunities, Denver, Colorado, Sep. 2005, pp. 18-21.
 - 17.S. Snyder, B. Vanderford, R. Pearson, O.Quinones, and Y. Yoon, “Analytical methods used to measure endocrine disrupting compounds in water,” Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management, Vol. 7, 2003, pp. 224-234.
 - 18.T.A. Ternes, M. Meisenheimer, D. McDowell, F. Sacher, H.J. Brauch, B.Haist-Gulde, G. Preuss, U. Wilme, Z. Zulei-Seibert, “Removal of Pharmaceuticals during drinking water treatment,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 36, 2002, pp. 3855-3863.
 - 19.J. De Rudder, T. Vande Wiele, W. Dhooze, F. Comhaire, and W. Verstraete, “Advanced water treatment with manganese oxide for the removal of 17 α -ethynylestradiol (EE2),” *Water Research*, Vol. 38, 2004, pp. 184-192.

作者簡介

張琰堉 先生

現職：臺北自來水事業處淨水科三級工程師

專長：化學工程、環境工程、淨水處理、自來水工程設計及施工

草山水道系統歷史演進與運用現況

文/陳俊豪

一、前言

草山水道於 1932 年完工啟用至今已近百年，為日據時期全台單一水道工程中耗資最龐大、系統完整、成熟且獨一無二的水道工程，系統取用陽明山第一、第三水源，其水質純淨，無須再經淨水設備，經加藥後即可直接飲用，其輸送過程完全未設置任何加壓設備，全程依自然地形輸送水源，並利用地形落差於三角埔發電所進行水力發電後，長程輸送至圓山貯水池，並附掛於明治橋（今中山橋）越過基隆河，沿敕史街（今中山北路）南下，與臺北城區既有幹線連接。

戰後因臺北市人口增加，雖然已另覓其它水源供應，但該水道至今仍然持續使用，為部分天母次高地區主要供水水源，為此臺北市政府首開國內「系統性文化資產保存」先例，於民國 93 年 4 月 28 日公告指定「草山水道系統」為市定第 111 號古蹟。

本系統為臺北水道工程重要一環，見證臺北城都市發展史，其成熟且獨一無二的水道工程至為珍貴，值得自來水工作者及關心臺北水道發展史者深入了解。

二、草山水道系統歷史演進

臺灣位於亞熱帶地區，瘴癘之氣盛行，早在鄭成功初到臺灣的時候，就曾深受其害，「水土不服，疫癘大作，病者十之七八，死者甚多。」清領時期，人們對於臺灣各地的風土亦多此類敘述：「南、北淡水均屬瘴

鄉。南淡水之瘴，作寒熱，號跳發狂。治之得法，病後加謹即愈矣。北淡水之瘴，瘠黝而黃，脾泄為痞、為鼓脹。蓋陰氣過監，山嵐海霧鬱蒸，中之也深。又或睡起醉眠，感風而發，故治多不起。要節飲食、薄滋味、慎起居，使不至為所侵而已。」，至於在馬關條約簽訂之後統治臺灣的日本人，早在牡丹社事件發生時，即領教過臺灣特殊的氣候與「瘴癘之氣」，根據史料的記載，當時日本人因感染臺灣熱而死亡的人共有 642 人，染病者更多達 26,094 人。甲午戰爭結束，馬關條約簽定之後，日本正式進入臺灣進行全島接收，除了要面對民眾反抗之外，還必需面對傳染病蔓延的問題。

當時臺灣總督府經過一番調查，認為軍隊與官方人士染病的原因主要是因為土地不潔與衛生狀況不佳，在飲用水的部分，日本人認為當時臺灣的城市飲水多以井水為主，山間的飲水則以溪水、泉水為主，但井的開鑿屬淺水井，且位置接近家庭污水排放的地方，導致飲用水容易被污水污染。另日本本土早於 1850 年代開放港口之後，雖然帶來貿易的成長，但是傳染病也隨之進入日本，加上人口增加與都市化的發展，在飲用水尚未進行改革前的日本，便深受以水為傳播媒介的傳染病之苦。為了控制疫情，日本在各方嘗試之後，發現改善用水品質可以有效控制傳染病的蔓延。

鑑於日本本土之經驗，認為改善飲水是

減少傳染病的重要方法，第四任臺灣總督兒玉源太郎接受後藤新平的推薦，聘請英國籍工程技師巴爾頓擔任臺灣衛生工程顧問一職，展開一連串調查，主要發展大致可分成二個階段：西元 1895 年到西元 1920 年為調查與初創期；西元 1921 到西元 1945 年則是穩定發展與擴張期。總計日本據台的五十年共完成了約 114 處的水道設施。

臺北水道第一次水道工事建於 1907-1909 年，依據巴爾頓的意見，選定在公館觀音山腳設取水口，自新店溪引取原水在觀音山麓設淨水場處理，處理後之淨水再加壓送至觀音山上配水池，藉重力自然流下供應市區使用，原計畫最大的供水人口預估為 15 萬人，可滿足臺北城到 1929 年之用水人口，惟至 1925 年給水區域內之人口已達 18 萬人，且每人每日的最大用水量大幅增加，已達原計畫 3 立方尺（83 公升）的三倍，約 9 立方尺（249 公升），由於人口激增，臺北水道新店溪水源已達上極限，另闢水源乃當務之急，是以日本人多方勘查在陽明山覓得 3 處水源，分別為陽明山第一、二、三水源，其中第二水源的水量不多，水質也較不潔淨故未採用。

三、草山水道系統設施保存現況

整個草山水道系統水源建造於 1928-1932 年，取用於竹子湖下方 1 公里第一水源，經過 542 公尺鋼筋混凝土渠道（61cm*46cm 寬*深）到達第一接續井（竹子湖玉瀧谷），再經由高壓鋼管通過大屯瀑布（青春嶺步道旁）設置第一水管橋，通過陽明山花鐘公園前溪谷第二水管橋，到達第二接續井

（陽明山國家公園人車分道點前方），續經過陽投公路經草山水橋至氣曝室氣曝後，再進入連絡井與第三水源的水在此匯集，緊接著由導水暗渠輸送 1,517 公尺（天母古道）到達配合發電作用之調整井，再利用地形陡差經過設置 600mm-500mm-450mm 高壓鋼管縮管後進入三角埔發電所進行發電（設計之初利用與調整井 209 公尺的落差產生五百千瓦的電力，目前僅保留一組發電機組作為展示之用，三角埔發電所已轉型為小型加壓站），發電後經中山北路到達捷運劍潭站對面圓山配水池儲留後（設計容量約 10,000 噸，可儲存第一水源取入井及第三水源取入井 8 小時半的湧水量），後續沿中山橋、中山北路輸送到當時的總督府一帶（供水系統詳如圖 1），供應給市區使用（因水量有限，目前約僅供應中山北路七段 114 巷以上一帶用戶使用）。

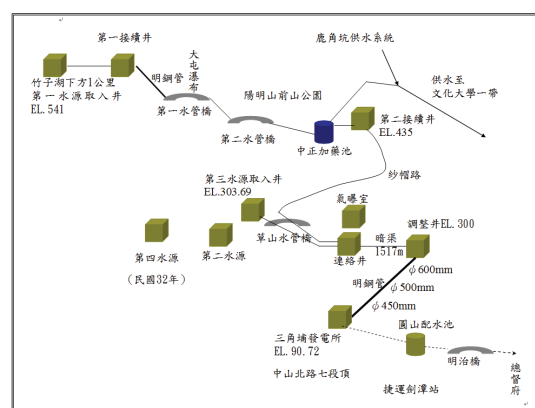


圖 1 草山水道系統圖

草山水道系統各設施之名稱、位置、保存與使用情形，依其輸水順序如下（照片詳如圖 2）：

（一）第一水源取入井：位於北投區七星山西麓竹子湖溪山谷東側，入口上方題有「滾水頭」字樣。保存良好並使用中。

- (二)第一接續井：位於今陽明山大屯瀑布「青春嶺」上方高地，建築保存良好並使用中。
- (三)水管階梯：為第一接續井至第一水管橋間的陡坡（今青春嶺步道），部分坡段直接利用水管坡面設置為階梯。
- (四)第一水管橋：位於陽明山大屯瀑布南側，跨越今陽明溪橋體基礎、橋墩等主體構造保存良好並使用中。
- (五)第二接續井：距第一接續井約 1.9 公里，位於湖山路一段 15 號旁（陽明山國家公園人車分道點前方），建築保存良好並使用中。
- (六)第二水管橋：位於陽明山第一停車場與花鐘公園之間，跨越紫明溪。其規模與構造略同於第一水管橋，基礎構造尚存，惟管線已更新至道路，目前未使用。
- (七)第三水源取入井：位於北投區紗帽山南側、淞溪溪谷北側，入口上方題有「湧泉臺」字樣，建築保存良好並使用中。
- (八)草山水管橋：橋寬 2 公尺，長 48 公尺，其中拱的跨度為 15.25 公尺，桁橋跨度 5.3 公尺者有三處，5.45 公尺者有兩處，為 R.C.構造，位於第三水源與氣曝室間，跨越淞溪，整體構造保存良好並使用中。
- (九)氣曝室：士林區愛富三街十二巷底下方，建物保存良好，原設計為除去第一水源取入井的鐵質，但氣曝室約在戰後便已停用。
- (十)連絡井：位於氣曝室前下方，建物保存良好，現於此處加次氯酸鈉進行消毒處理。

	
第一水源取水井	第一接續井
	
水管階梯輸水明管	第一水管橋
	
第二水管橋	第二接續井
	
第三水源取入井	草山水管橋
	
連絡井	氣曝室
	
調整井	水管路鑄鐵明管

圖 2 草山水道系統設施照片



(十一)天母水管路：自第三水源至三角埔發電所，導水暗渠長約 1,517 公尺（鋼筋混凝土造上覆鋼筋混凝土蓋 76cm*67cm 寬*深）埋設於道路下方，目前使用中。

(十二)調整井：位於天母水管路之終點，保存良好並使用中。

(十三)三角埔發電所：現代式建築，面積 155 平方公尺，位於中山北路七段底，出入口另有一座警衛室（面積 27 平方公尺），整體建物保存良好，目前已改為天母高地配水池之加壓站使用中。（平面配置圖如圖 3、結構平面圖如圖 4、設施照片如圖 5）

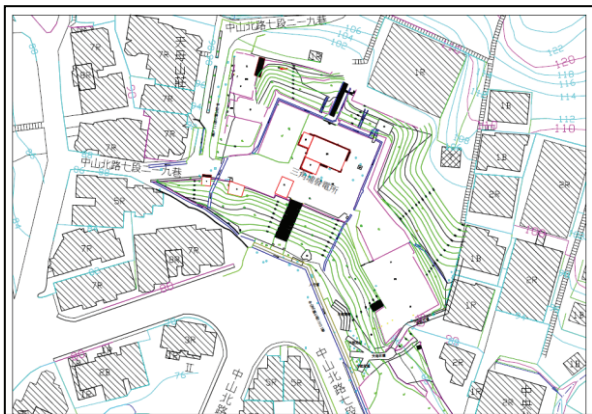


圖 3 三角埔發電所平面配置圖

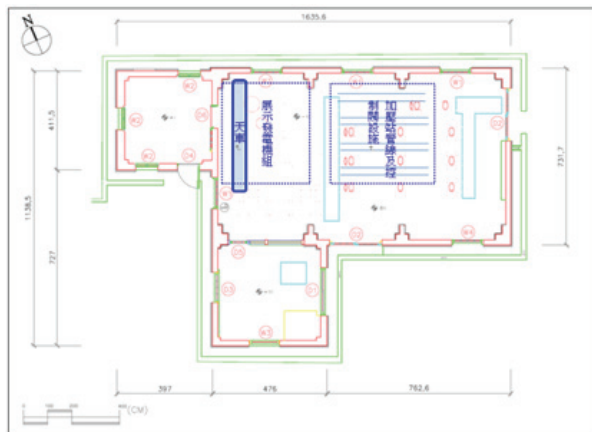


圖 4 三角埔發電所建築結構平面圖



圖 5 三角埔發電所設施照片

(十四)圓山貯水池：位於今捷運劍潭站對面山坡上（北水處陽明分處後方高地）。貯水池東西側有兩處入口兼通氣高塔，西側入口題有昭和十三年落款之「活水頭」字樣。水池構造為鐵筋混凝土，長約 75 公尺，寬約 40 公尺，地下開挖深度約 4 公尺；水池內部設有九面導流壁，作為導引水流繞流之用，使池內貯水保持新鮮均勻，整體構造保存良好，目前未使用。

(十五)量水室：位於貯水池上方，建物保存良好，目前未使用。

(十六)鑄鐵排氣管：為保持池內通風，水池頂部設有六十具通氣管，原有六十具，尚餘兩具。

(十七)八角配水井：八角型鐵筋混凝土建

築。其功能為控制自三角埔發電所經高壓鑄鐵管送入貯水池之水量、水壓，以及貯水池因清洗或其他因素故障時，水源在此并直接轉由普通鐵管配水，建物保存良好，目前未使用。

(十八)圓山水神社：位於圓山貯水池南側，圓山貯水池原始之設計為一狹長隧道型水槽，因山壁開挖後造成崩塌而變更設計，此一意外事件造成人員死傷，故臺北市役所水道課員工捐款興建此一神社，以紀念喪生同事，石燈籠下部可見刻有「水道課有志」字樣。現存圓山水神社石碑一具、手洗舍石製水槽一座、石燈籠兩對共四具、石獅一對、涼亭一座。(平面配置圖詳如圖 6、剖面圖詳如圖 7)

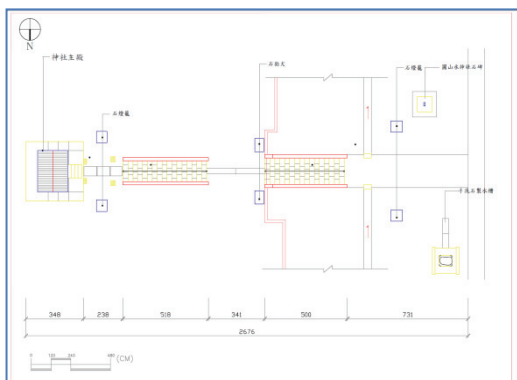


圖 6 圓山水神社平面配置圖

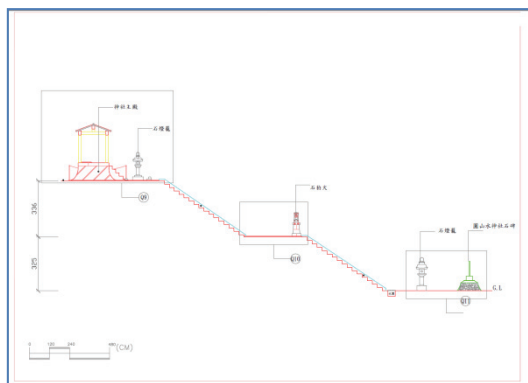


圖 7 圓山水神社全區剖面圖

四、草山水道系統設施運用現況

北水處陽明淨水場轄區涵蓋臺北市士林、北投區高地區，目前合計有 16 處水源，除鹿角坑水源外，其他水源均為重力自然流下，總出水量約為 35,000~45,000 噸。

其中位於陽明山國家公園生態保護區內之鹿角坑水源，為陽明山高地區唯一供水水源，也是其餘次高地區重力水源之主要備載水源，當高地區其他重力水源不足時，則透過鹿角坑第一、二、三加壓站(詳圖 8)經三段加壓供水予以支援，惟需付出高額動力加壓費用供水。



圖 8 鹿角坑第三加壓站供水示意圖

在北水處高地水源，優先提供高地使用原則下，北水處在第一水源進入第二接續井前目前進行三項供水調整措施。

(一)於第二接續井前設置中正加藥池(詳圖 9)

文化大學及山仔后一帶，用戶數約 3,737 戶，配水量約 8,407CMD，為陽明山最主要供水區域，供水條件利用陽一水源湧泉水質潔淨、水量穩定之特性，為該區域主要供水水源，用水尖峰時，北水處另於陽明山第二停車場設置一處控制點(詳圖 10)，其控制點電動閥與中正加藥池水位進行連動，當中正池於低水位時逐步加開鹿角坑水源為輔助

水源，除避免第一源與因鹿角坑水源高程較高之水量競合外，亦減少中正池溢流量(第一水源屬湧泉，水量穩定，夜間及離峰時將溢流經過第二接續井回到原系統)，有效將高地水源留供高地使用，並減少鹿角坑水源水量，節省動力費用，穩定供水。

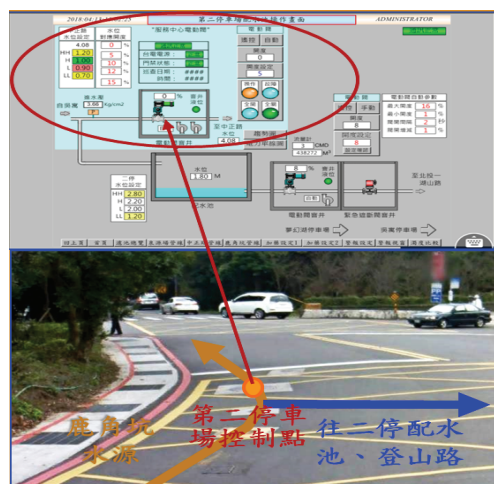


圖 9 中正加藥池供水區域圖

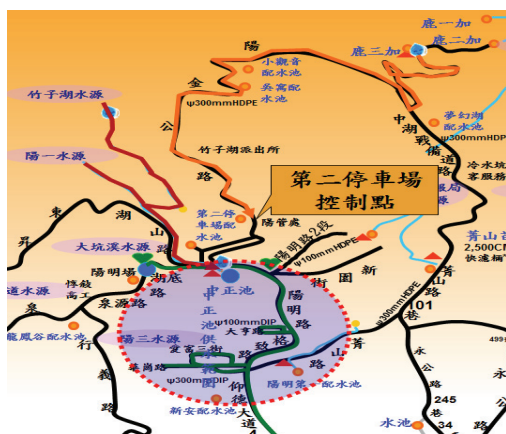


圖 10 第二停車場控制點與中正池水位連動控制

(二)調整北投區東昇路、登山路及北投第一水源之補充水源由第一水源供應(圖 11)

原供水範圍係由鹿角坑水源經第二停車場水池直接進行供水，極度耗費動力費用，目前北水處已於陽明山公園轉彎處新增第一水源管線連絡，將東昇路及登山路水源

切換改為第一水源水源支應，則每日可減少約 500~1,000CMD 鹿角坑水源出水，節省動力費用。



圖 11 調整北投區東昇路、登山路供水圖

(三)以第一水源作為北水處陽明淨水場本場快濾池反沖洗水源(圖 12)

北水處陽明淨水場目前計 6 池快濾池(圖 13)，每日要反沖洗 2 池快濾池，場區腹地狹小且水量有限，當濾池要進行反洗時，無法利用其餘各池之濾水進行反沖洗，而本場目前係引用大坑溪地面水水源，原水水質易受環境所影響，造成濾池容易阻塞或過濾水質不佳情形，亟需尋找潔淨水源作為反沖洗水源。由於第一水源水質純淨甘美、無需過濾、沉澱等處理，經加藥後即可直接飲用，北水處目前於進入第二接續井前於湖底路口埋設管線，經湖底路及泉源路進入陽明淨水場後方高地之 100 噸反沖洗水池，作為北水處陽明淨水場快濾池反沖洗水源。而快濾池為淨水場操作與維護成本最高的單元，也是淨水場的最後一道防線，第一水源全程以重力輸送作為反沖洗水源，除提供潔淨反沖洗水源外，亦節省輸送過程動力費用。



圖 12 第一水源切換為反沖洗水源



圖 13 陽明淨水場快濾池照片

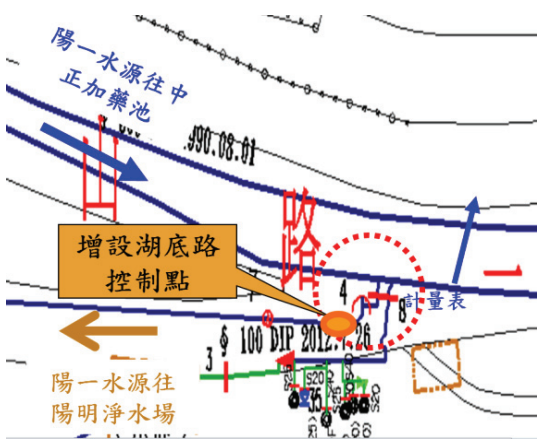


圖 14 湖底路控制點

另陽明淨水場常因夏季時無雨缺水，無法穩定出水，須啟動位於北投區之新民加壓站補充龍鳳谷配水池出水量不足，北水處目

前已規劃設置湖底路控制點(圖 14)，能彈性支援陽明淨水場供水，節省啟動新民加壓站之動力費用。

五、草山水道系統與社區互動

系統中陽明山第三水源區位於紗帽山麓，園區內有全世界數一數二水質之天然湧泉，水質清澈見底，水面閃著藍色波光，有「藍寶石水」美稱，及三角埔發電所風景優美環境清幽，近年來天母地區之文史團體及國民中小學每年均會於三角埔發電所舉辦天母水道祭活動，至 2019 年已邁入第 17 屆，每年均有超過數以千計的社區民眾及國中、小學同參與相關活動。同時選定假日期間配合開放第三水源區，供民眾進入園區內試飲天然湧泉，並辦理生態教育及導覽活動，有效提升水道系統能見度，已成為天母地區具有指標意義的文史性古蹟，累積相當知名度。(圖 15)



圖 15 天母水道祭活動

北水處 103 年度亦嘗試辦理定時定額導覽活動，於 103 年 11 月起辦理十梯次 250 名民眾導覽活動(圖 16)，為首次主辦第三水源區開放活動，受到市民樂烈歡迎，其中亦不乏中南部民眾專程報名及驅車北上參加。



圖 16 北水處 103 年定時定額導覽活動

作者簡介

陳俊豪先生

現職：臺北自來水事業處淨水科三級工程師

專長：自來水工程施工、淨水設施規劃施工

六、結語

草山水道系統的興建是臺北都市發展史上重要的歷史印記，且尚在使用中，不僅是歷史的見證，更是文化的軌跡，透過水道系統的探索，讓我們對水道系統有更深一層認識，系統多處呈現知性、人文與歷史，兼具教育與娛樂的型態，非常適合市民當日往返旅遊，但由於水源管制，尚未全面對外開放，然在臺北市近郊陽明山國家公園的優美環境中，具有如此具有珍貴古蹟及歷史價值的水道系統，有需要更深一步的認識、珍惜與保存。

參考文獻

1. 阮旻錫，《海上見聞錄》，頁39。
2. 《續修臺灣府志》，卷十三〈風俗(一)〉，氣候，頁504。
3. 閻亞寧(2008)，《市定古蹟草山水道系統建築物及設施修繕維護調查規劃報告書》(臺北市：中國工商專校)
4. 詹坤耀、顧峻，「陽明山湧泉及地面水操作模式」簡報，2013年。
5. 白耀宏，「陽明山高地區供水現況報告」簡報，2013年。

水管橋型式及其應力分析

文/曾浩雄

一、基本概念

(一)水平抵抗力

水平外力來自水平彎管內壓及流速造成之離心力，水平抵抗力則來自固定台及覆土自重產生之固定台底部土壤磨擦力，加上固定台側面土壤產生之被動土壓力，若磨擦力及被動土壓力無法克服大偏角之水平外力，就需要補打橫力樁。若因用地限制，有時固定台會被迫設在路堤邊坡上，此時有效被動土壓力還要考慮予以折減。

(二)垂直抵抗力

垂直外力亦來自垂直彎管內壓及流速造成之離心力，向上垂直抵抗力則來自固定台底部土壤承载力，向下垂直抵抗力則來自固定台及覆土自重，若有不足就需要補設基樁。

(三)兩端支撐方式

若採用拱形橋，兩端支撐方式宜採用固定，在承受均佈荷重情況下不但端點力矩=0，其向上或向下彎曲，均可吸收熱漲冷縮之外力；以直線方式之過橋管，其中一端宜採用自由端方式以吸收熱漲冷縮之外力。

(四)溫度變化產生之應力

鋼鐵之膨脹係數 $=12\sim13\times10^{-6} \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ ，若溫度上升/下降 40° ，則 50 m 長之水管其伸長或縮短之長度 $\Delta l = 50 \times 1000 \times 12.5 \times 10^{-6} \times 40 = 25 \text{ mm}$ 。其應變 $\epsilon = \Delta l / l = 25 / (50 \times 1000) = 0.0005$ 。應力 $\sigma = E \times \epsilon = 2.1 \times 10^6 \times 0.0005 = 1050 \text{ kg/cm}^2$ ，相當大，故應予特別考

慮。

(五)水管防震措施

輸水管若有結構體界面的剛性差異性大之情況，如橋墩結構物與管路之連接處，則在兩者之間將因承受各類載重作用，致發生相對變位量，故宜使用能吸收相對變位的撓性接頭(如可撓管)，以吸收相對變位量，並避免造成設施結構之損壞。依日本水道協會水道施設耐震工法指針與解說(1997)---耐震設計之基本方針之第 1.1.4 條「耐震性之高等材料與接頭的選擇」，闡釋撓性接頭選用原則如下：因地震而產生結構物連接部之相對變位，應設計具有撓性的耐震接頭，以吸收變位量及降低應力；故輸水管道設施的主要構造界面處，須使用能確保水密性之高等材料。水管橋之輸水鋼管管體與橋墩之彎管固定台係屬兩種不同勁度的結構體，當在各類載重作用之下，如地震力、彎管處之管內水壓所生之不平衡力、溫差效應等，為避免不同勁度結構體的交互作用，宜在兩者界面處設置撓性接頭，以達隔離效果，並可確保結構體的安全性暨維持既定的功能性。

(六)伸縮接頭

橋胸牆或帽梁上方之輸水鋼管直管段與彎管固定台的構造界面處，選用具有 75mm 容許伸長量之伸縮接頭，以隔離不同勁度結構體的交互作用，並確保結構體的安全性暨維持導水的功能性。

二、水管橋之材質

拱型水管橋在橋上不宜有接頭，因此其材質原則上都採用鋼管。但目前高密度聚氯乙烯管，若製管時加入碳黑，其抗紫外線能力可大幅提升，使用壽命也因此可延長至 50 年，而且其接頭已改用西德研發之 CNC 電腦數值控制熱溶接法，因而大幅降低接頭失準率，尤其是因質輕(比重只有 0.95)，可減少因其自重所產生之力矩，尤其是其摩擦係數比其他管種大，損失水頭較小故流量可較大，因此採用 HDPE 管也是一種很好的選擇。

三、水管橋之形式

水管橋之形式相當多，大致上分為直接通過式、加勁通過式、桁架式、拱橋式、斜張橋式等 5 大類，茲詳述如下：

(一)鋼管直接通過式

大口徑之水管橋，因其自身之慣性力矩 I 值較大，若水管橋係屬短跨距(約 47m 內)，則因其本身之徑度可支撐其荷重(含自重及水重等)，故可直接跨過，詳如圖 1。

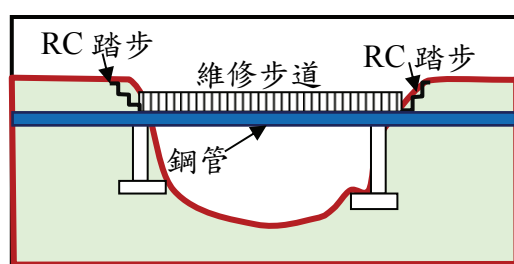


圖 1 直接通過式示意圖

(二)鋼管加勁式

小口徑之水管橋，因其自身之 I (值較小)，若水管橋跨距較長，則因其本身之徑度無法支撐其荷重，故需增加鋼管厚度或中央加焊鋼板甚至利用加設維修步道提高其 I 值，如圖 2。

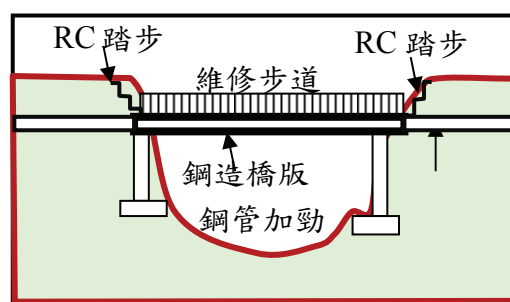


圖 2 如動式水管橋示意圖

(三)上拱式

水管藉由上拱橋支撐方式通過，短跨距者採用單孔式拱橋如圖 3 所示。另外跨距較長水管，則採用上拱式多孔式拱橋如圖 4 所示。

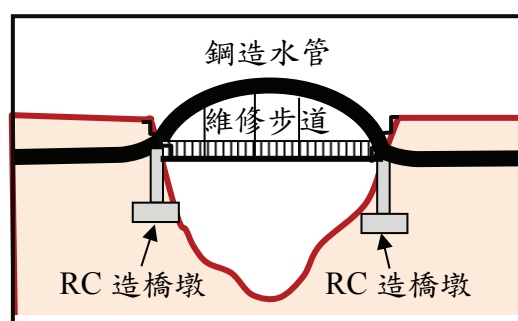


圖 3 單孔上拱式水管橋示意圖

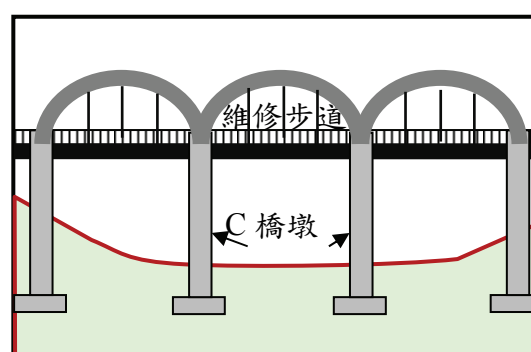


圖 4 多孔上拱式水管橋示意圖

(四)下拱式

水管藉由下拱橋支撐方式通過，短跨距者採用單孔式拱橋如圖 5；長跨距者採用多孔式拱橋如圖 6 所示。

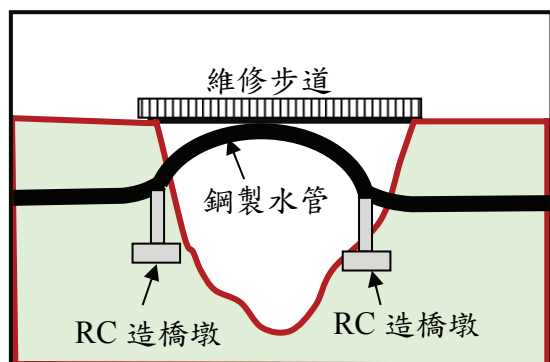


圖 5 單孔下拱式水管橋示意圖

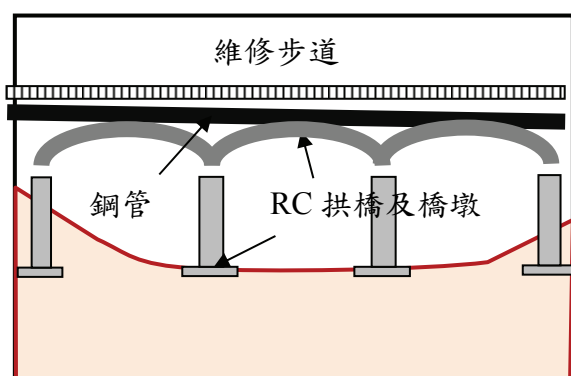


圖 6 多孔下拱式水管橋示意圖

(五)桁架式

小口徑之水管橋，因其自身之 I 值較小，若水管橋係屬長跨距，則因其本身之徑度無法支撐其荷重(含自重及水重等)，故藉由桁架支撐，水管跨座在行架上，(桁架可兼作為維修步道)，詳如圖 7 所示。

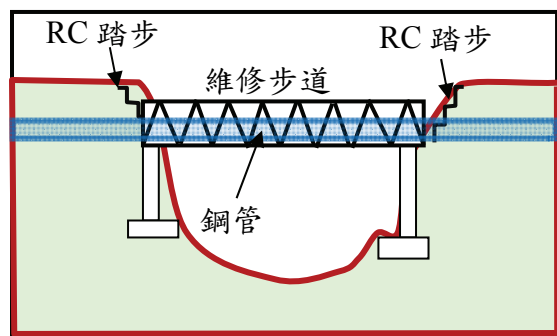


圖 7 桁架式通過式示意圖

(六)斜張橋式

大口徑且跨距特長，則因其本身之勁度無法支撐其荷重需藉由斜張橋支撐，水管跨坐在橋上。斜張橋分為背脊式(圖 8)及中央支柱式(圖 9)。

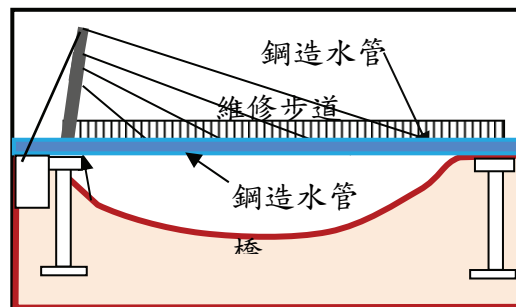


圖 8 背脊斜張式水管橋示意圖

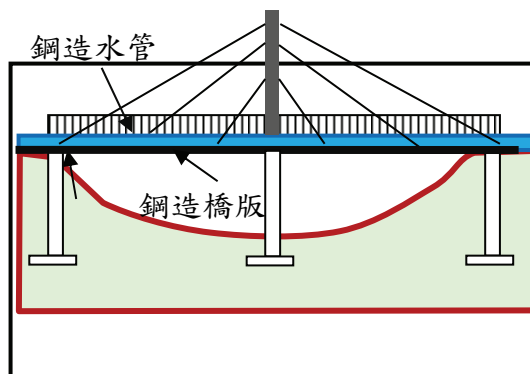


圖 9 中央支柱斜張式水管橋示意圖

四、水理分析與管材之關係

若因大環境之限制，無法採用下拱型水管橋時，務必考慮管頂高程必須位於水力坡降線之下。必要時在水管橋之上游加壓方式送水。但若供水起點之操作水頭夠高，其可用水頭足以將水送過水管橋管頂，當然橋前不必加壓。惟若橋前經過一段超低路段(其淨水頭大於 50 公尺時)，依照管線設計原則，在位差未達 50 公尺前必須加設減壓閥(或減壓池)，但因減壓後其剩餘水頭卻不足以將水送過水管橋之頂端。在此情況下，絕對不可設置減壓閥，然後在通超低路段後再予加



壓。其最佳方式是將超低路段之管線採用耐高壓管。原則上，在高差小於 50 公尺路段可採用 7.5K 之管材(安全係數採用 1.5)，在 50 至 60 公尺高差路段採用 10.0K 之管材，高差超過 50 公尺時，必須採用耐高壓鋼管。

五、耐壓管厚度之計算法

水管橋前之地路段若其高差為 80 公尺，則其靜水頭 = 80 m，亦即這段管線將承受內壓 $p = 8.0 \text{ kg/cm}^2$ 。若安全係數取 1.5，則管線須能承受 12 kg/cm^2 之內壓。在此情況下 300 mm ϕ 之管線，其管壁承受之環張力 $T = p * r / 2 = 12 * 300 / 2 = 1800 \text{ kg/m}$ 。

鋼板之容許抗環張力 = 1000 gf/cm^2 ，因此其厚度 $t = 1800 / 1000 = 1.8 \text{ cm}$ ，依照規範內外各預留 0.1 cm，作為日後腐蝕之用。故真正之厚度 = $1.8 + 0.1 * 2 = 2.0 \text{ cm}$ 。

六、材料容許應力

- (一)鋼材：輸水鋼管 SM 400 或 ASTM A 36， $F_y \geq 2400 \text{ kg/cm}^2$ 。
- (二)鋼筋：直徑 $\leq 16 \phi$ ， $F_y \geq 2800 \text{ kg/cm}^2$ 。直徑 $\geq 19 \phi$ ， $F_y \geq 4200 \text{ kg/cm}^2$ 。

七、基本載重

- (一)設計水壓：4 至 5 kg/cm^2 (安全係數 S.F.=1.5，已考慮水錘效用)。
- (二)容許撓度：1/350 跨度。
- (三)風速：二級強風地區設計風速 $q = 150 \text{ m/sec}$ 。
- (四)風力強度： $P = c * q * A = 0.8 * 150 * A = 20 \text{ kg/m}^2$ ，圓形構件面積數 $c = 0.8$ 。
- (五)步道通行活載重： 100 kg/m^2 。

(六)溫度變化： $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ (RC)， $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ (鋼構)， $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ (鋼水管)。

(七)地震力：考慮靜力與動力分析。

八、上部結構作用力分析

(一)基本數據

1.鋼管橋橫斷面圖詳如圖 10。

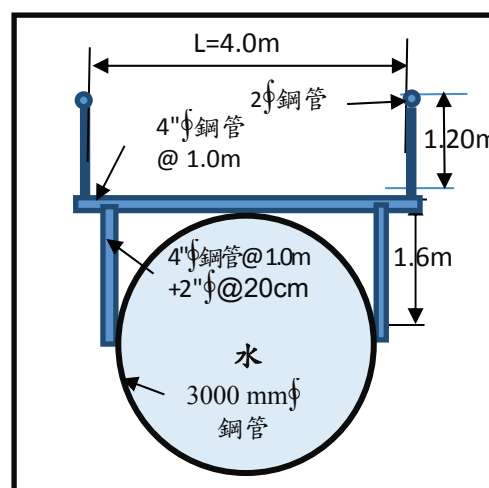


圖 10 步道含欄杆示意圖

- 2.拋物線拱高 $f = 5 \text{ m}$ ，跨距 $L = 50 \text{ m}$ 。水管設水管口徑為 3000 mm ϕ ，厚度 2 cm。
- 3.主鋼管斷面積 $A = 3.14 * ((300 + 2)^2 - 300^2) / 4 = 945.14 \text{ cm}^2$ 。
- 4.鋼管之慣性力矩 $I = 3.14 * (304^4 - 300^4) / 64 = 21622681 \text{ cm}^4$ 。
- 5.鋼管之面積係數 $Z = 21622681 / (304 / 2) = 142254.5 \text{ cm}^3$ 。
- 6.護欄豎杆所具有之 I 值略而不計。

(二)載重

- 1.鋼管單位載重量 = $0.02466 * (\text{外徑} - \text{壁厚}) * \text{壁厚} = 0.02466 * (3040 - 20) * 20 = 1489.46 \text{ kg/m}$ 。滿管水載重 = $1 * 3.14 * 3^2 / 4 * 1000 = 7065 \text{ kg/m}$ 。
- 2.欄杆鋼管(SCH160S)單位重量：4" ϕ 外徑 =

114.3 mm，重=11.53 kg/m，3" ϕ 外徑 = 88.9 mm，重 = 8.88 kg/m，2" ϕ 外徑 = 60.3 mm，重 = 5.62 kg/m。

3.鍍鋅柵隔板單位重量 = $1.05 \times 4 \times 1 = 4.2$ kg/m。水管橋每 1m 長總重量 = $1489.46 + 7065 + 100$ (活載重) = 8811.92kg/m。以 9000 kg 計。

4.風載重： $0.8 \times 150 \times A (f \times D0)$ kg。

(三)結構分析使用之程式

參考台灣世曦公司在網路上發表之「大口徑輸水管橋設計案例探討」專文，其結構分析所使用之程式為 RM2000，ISDS STAAD3，本文採用手算法(在河川中設置橋墩者才需要利用程式計算其沖刷力學)。

(四)水管之軸向推力

1.地震時固定環梁因伸縮摩擦產生之推力 $P1=R \times f$ ，式中之 R =支點反力， f = 固定環之摩擦係數 = 0.25。

2.地震時固定環梁因伸縮接縫摩擦產生之推力 $P2 = f' \times \pi \times D0$ ，式中之 f' = 固定版環伸縮接縫之摩擦力=7.0 kgf/cm²。

3.伸縮接縫處內壓產生之推力 $P3 = p \times \pi \times Dm \times t$ ，式中之 P = 設計內壓(5 kgf/cm²)。
 Dm = 軸力作用面之中心直徑。內壓面積 = $\pi \times Dm \times t$ 。 t = 管厚 (cm)。

4.管之軸向推力總和 $\Sigma P = P1 + P2 + P3$ 。

5.管之軸向推力產生之應力 $\sigma P = \Sigma P / A$ 。

6.因環狀支座束制產生之彎曲應力 $\sigma pr = 1.82 \times (Ar - B0 \times t) / Ar \times (P \times ri / t)$ ，式中之 Ar = 環狀版面積， $B0$ = 環狀支座之有效寬度， t = 管厚， P = 設計內壓， ri = 管內半徑。

(五)地震靜力分析方法：

設計水平地震，分析時取下列兩者：

1.建築物耐震設計解說及水管橋的耐震設計範例解說(2002 版)」第 4.8 節，水管橋的耐震設計範例所述：在主要結構物中，耐震設計是依第 1 級地震之震度法加以考慮；環狀支座及其支撐與防止落橋系統等支點處，因會受到地震之影響，故須以第 2 級地震之震度法為設計考量之依據。

2.在水管中，通常顯著之風荷載重發生情形比慣性力多，故考慮水管橋水平載重時，應採水平荷載重與風荷載重之較大者。

十、長期作用力

(一)鋼管直接通過式

1.設水管之內外徑分別為 $Di = 3000$ mm ϕ 及 $Do = 3040$ mm ϕ (管厚 = 20mm)，則其自身之 I 值 = $\pi \times (Do^4 - Di^4) / 64 = 3.14 \times (3040^4 - 3000^4) / 64 = 21622680$ cm⁴。 $Z = I / D0 = 21622680 / (304 / 2) = 142254.5$ cm³。

2.假設水管橋係屬短跨距 $\ell = 5$ m。根據「結構力學設計手冊」，兩端均為固定時，其固定端之力矩 $MA = MB = -w \times \ell^2 / 12 = 9000 \times 500^2 / 12 = 187500000$ kg-m；中央之力矩 $MC = w \times \ell^2 / 24 = 9000 \times 500^2 / 24 = 93750000$ kg-cm。

3.兩端承受之拉應力 $\sigma = 187500000 / 142254.5 = 1318.06$ kg/cm² < 1400 kgf/cm²，OK。

(二)鋼管加勁式

1.設水管之內外徑分別為 $Di = 1200$ mm ϕ 及 $Do = 1201.2$ mm ϕ (管厚 6mm)，則其自身之 Z 值 = $3.14 \times (121.2^4 - 120^4) / 64 / (121.2 / 2) = 6816.65$ cm³。

2.水管單位載重量 = $0.02466 \times (1201.2 - 6) \times 6 = 178.44$ kg/m，水重 = $1 \text{ t/m}^3 \times 1.20^2 / 4 \times$

$1000 = 1130.4 \text{ kg}$ ，活載重 $=100 \text{ kg/m}^2 \times 1 \text{ m} = 100 \text{ kg}$ ，水管橋重量(未設維修步道) $w = 178.44 + 1130.4 + 100 = 1408.4 \text{ kg/m}$ ，以 1410 kg 計。

3.若水管橋係仍屬短跨距 $= 8 \text{ m}$ ，兩端支撐為一端固定；另一端自由，則其固定端 $MB = -w \times l^2 / 8 = 1410 \times 800^2 / 8 = 1.13 \times 10^8 \text{ kg-m}$ ，承受之拉應力 $\sigma = 1.13 \times 10^8 / 6816.65 = 16577 > 1400 \text{ kgf/cm}^2$ ，因其本身之徑度無法支撐其荷載重，故需增加鋼管厚度。

4.若水管固定端之管厚增為 30 mm ，則其自身之 Z 值 $= 3.14 \times (126^4 - 120^4) / 64 / (126 / 2) = 34801.18 \text{ cm}^3$ 。承受之拉應力 $= 44062500 / 34801 = 1266.12 < 1400 \text{ kgf/cm}^2$ 。

(三)加設維修步道

- 1.為了管橋日後維修之需要，宜加設維修步道，若比照圖 11 所示之構造辦理，則可增加其慣性力矩。
- 2.若只計縱向鋼管(豎向及橫向鋼管略而不計)，並以上桿中心為承受二次應力中立軸，則 $4" \text{ } \phi$ 鍍鋅鋼管本身之 I 值 $= (3.14 \times (11.43^4 - 0.63^4) / 64 \times 2 \text{ 支} = 421.92 \text{ cm}^4$ 。另外 $4" \text{ } \phi$ 鍍鋅鋼管對中立軸所增加之 I 值 $= A \times d^2 = 3.14 \times (11.43^2 - 10.63^2) / 4 \times 120^2 = 398986 \text{ cm}^4$ 。
- 3.扶手 $2" \text{ } \phi$ 鍍鋅鋼管本身之 I 值 $= (3.14 \times (6.03^4 - 5.27^4) / 64 \times 2 \text{ 支} = 54 \text{ cm}^4$ 。
- 4.總 I 值 $= 421.92 + 54 \times 398985.98 = 399461.9 \text{ cm}^4$ ， Z 值 $= 399461.9 / (6.03 / 2) = 1324915 \text{ cm}^3$ 。
- 5.固定端承受之拉應力 $= 44062500 / 132491.5 = 332.57 < 1400 \text{ kgf/cm}^2$ ，OK。

6.由以上之分析，過橋觀加設維修步道，其整體 I 值會大幅增加，因此鋼管加徑厚度可予減少。

7.無論是鋼管直接通過或加勁式通過，其因短作用力(風力或地震力)對水管所產生之應力影響不大，故不予贅述。

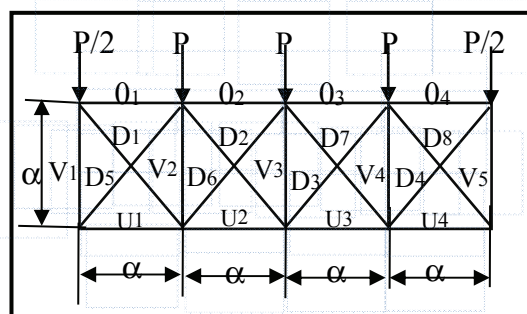


圖 11 桁架各構件編號圖

(四)桁架式

- 1.若水管橋係屬長跨距，且其本身之徑度無法支撐其荷載重，可藉由桁架支撐，再將水管跨座在桁架上。
- 2.一般採用桁架水管橋都將桁架兼做為維修步道，若步道上之鍍鋅格柵板固定在橫向鋼管上，鋼管再固定在格板上。則桁架承受之荷重應視為均佈荷重；但若格板上再加一橫桿，然後鋼管再固定在橫桿上，則桁架承受之荷重應視為集中荷重(如圖 11 所示)。桁架上各構件之編號詳如圖 11。
- 3.假設水管橋之口徑為 $1200 \text{ mm } \phi$ ，每公尺重量仍以 9000 kg/m 計，參照節構力學設計手冊所列之桁架，每隔 2 m 設一橫桿，則其作用在桁架 4 個節點上，則每一節點之之載重 $P = 9000 \text{ kg/m} \times 2 \text{ m} / 4 \text{ 點} = 450 \text{ kg}$ 。假設桁架兩端均為交接，則各構件之受力

之大小詳列如表 1。

表 1 桁架各構件應力表

構件編號	S(m)	N(T)
V1, V5	2	-0.348
V2, V4	2	-0.078
V3	2	-0.108
01, 04	2	-0.186
02, 03	2	-0.54
U1, U4	2	-0.3
U2, U3	2	0.594
D1, D4	2*2 ^{0.5}	0.262
D2, D3	2*2 ^{0.5}	0.078
D5, D8	2*2 ^{0.5}	-0.424
D6, D7	2*2 ^{0.5}	-0.151

4.桁架上各構件之受力與其橫豎桿之長度比有關，只要橫豎桿之長度比維持=1，則表上所列 S=2 m，已是一般桁架橫豎桿長度之較大值，設計時原則上宜採用 S = D0 + 0.6 m (維修步道之寬度)。

5.由上表可知 U2 及 U3 之作用力 0.594 為最大。每一節點之之載重 P = 450kg 時，U2 及 U3 之作用力 = 0.594 * 450 = 267.3 kg(一次又力)，其拉應力 $\sigma_t = 267.3 / (3.14 * 11.43^2 - 10.63^2) / 4 = 0.23 \text{ kg/cm}^2 < 1400 \text{ kgf/cm}^2$ ，OK。

6.整體桁架中點最大力矩 $M_{\max} = 3P * \ell / 5 = 3 * 450 * 800 / 5 = 21600 \text{ kg-cm}$ 。

7.整體桁架加鋼管，並以剛拐之中心為受中立軸若，若桁架採用 4" ϕ 鍍鋅鋼管，其本身之 I 值 = $(3.14 * (11.43^4 - 10.63^4) / 64 * 4 \text{ 支} = 843.83 \text{ cm}^4$ 。另外 4" ϕ 鍍鋅鋼管對

中立軸所增加之 I 值 = $A * d^2 = 3.14 * (11.43^2 - 10.63^2) / 4 * (304 + 11.43) / 2^2 * 4 = 4370 \text{ cm}^4$ 。整體桁架加鋼管之 Z 值 = $(21622680 + 4370) / ((304 + 11.43) / 2) = 137127.4 \text{ cm}^3$ 。其承受之拉應力 = $21600 / 137127.4 = 0.16 < < 1400 \text{ kgf/cm}^2$ 。

8.桁架上各構件之應力均很小，故可不必再予檢核。

9.因整體桁架之跨距只有 8 m，故最大力矩不大，其所承受之拉應力也很小，因此採用之鋼管口徑可予縮小。

10.若水管橋總跨距大於 8 m，則必須加設橋墩，否則須另就其應力重新加以計算，圖 12 所示之構造係屬靜不定結構，表 1 所列之應力係以虛功法求得，因為其算法比較繁瑣，故須從新計算時，可將斜桿(如圖 12 中之 D1 或 D5 取消)，將桁架改為靜定結構，則計算上會變得很簡單，當然各桿件之應力會因而增加。

11.虛功法是將圖 12 中之 D1 暫予切斷，使成靜定結構，設荷重 P 作用下靜定桁架之應力為 N0，然後沿 D1 桿施以靜不定力 X1=1，求得各構件之應力 N1，則原結構之應力 $N = N0 + N1 * X1$ 。13.若桁架承受均佈荷重，則其最大力矩 $M_{\max} = w \ell^2 / 8 = 9000 * 800^2 / 8 = 7.2 * 10^8 \text{ kg-cm}$ 。

12.桁架若採用 4" 鍍鋅鋼管則整體桁架之面積係豎 Z = 132491.5，其所承受之拉應力 $\sigma_t = 7.2 * 10^8 / 132491.5 = 5434 > > 1400 \text{ kg/cm}^2$ 不 OK。由此可知，採用桁架式水管橋時，其荷重宜採用集中荷重方式。

(五)中央塔柱式斜張橋

1.水管敷設在做為維修步道之小鋼管(4 吋 ϕ

左右)上(鋼管上先鋪一層鍍鋅格板,水管(鋼管)再固定架設於其上,詳如圖 12 所示。

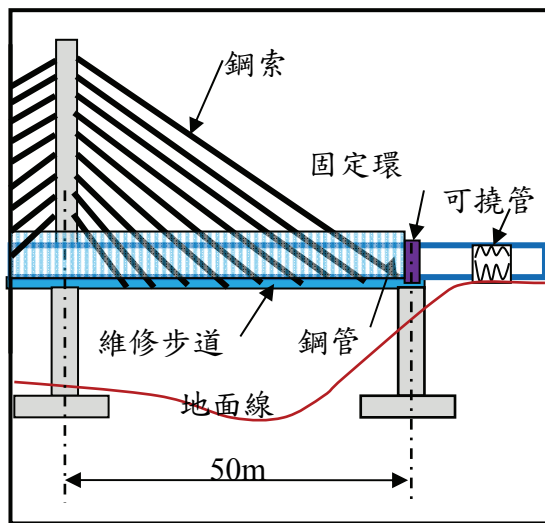


圖 12 斜張橋正面示意圖

2. 設水管口徑仍採用 3000 mm ϕ 。
3. 設中央塔柱全高 10 m, 最外鋼索接自高 9m 處(如圖 14), 因其底端距中央塔柱外緣= 50 - 5=45m 處。故其斜長 = $(9^2 + 45^2)^{0.5} = 45.89\text{m}$, 因此與橋面接點之夾角 $\theta = \sin^{-1}(9 / 45.89) = 11.31^\circ$ 。
4. 斜張橋各項設施及其力學分析圖詳如圖 13。

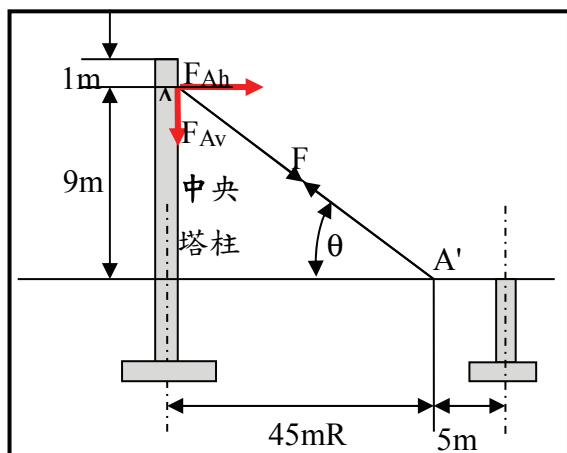


圖 13 斜張橋鋼索力學分析圖

5. 鋼索承擔橋面 5 長之荷載重, $= 9000 * 5 = 39050 \text{ kg}$, 亦即 $F_{AV} = 39050 / 2 = 19525 \text{ kg}$

(橋面兩側各一條)。

6. 設水管橋之跨距 $l = 100 \text{ m}$, 單位載重 $w = 9000 \text{ kg/m}$ 。根據「技工手冊」^[3], 鋼索採用直徑 20 mm ϕ , 由 114 根鋼絲組成, 每條 1.3 mm ϕ , 斷面積 176.6 mm^2 , 重約 1.66 kg/m 。
7. 拉力強度(斷折力) = 2282000 kg/cm^2 。 $F_{av} = 19525 + 1.66 * 45.89 = 19601.2 \text{ kg}$ 。 $F = F_{av} * 45.89 / 45 = 19601.2 * 45.89 / 45 = 19989 \text{ kg} < 2282000$, OK。
8. 由以上之分析可見越內側(靠近中央塔柱), 鋼索與橋面版之夾角越大, 因此其水平分力越小, 易言之, 若每根鋼索與橋面版之接點, 維持等距離, 則其所承擔之垂直水平分力勢必不相等。
9. 為使鋼索所承受之張力大致上都相等, 可其所負擔之橋面長度略予調整, 原則上靠近中央塔柱之鋼索負擔之橋面長度越長(可利用 Excel 加以試算)。
10. 若最外側鋼索距右端點 3m, 則其斜長 = $(9^2 + 47^2)^{0.5} = 47.85 \text{ m}$, 因此其所夾之角度 $\theta = \sin^{-1}(9 / 47.85) = 10.84^\circ$ 。
11. 鋼索承擔橋面 3 長之荷重, $w = 3 * 9000 = 23430 \text{ kg}$, 亦即 $F_{AV} = 11715 \text{ kg}$ (橋面兩側各一條)。
12. 鋼索荷重 + 自重 = $11715 + 1.66 * 47.85 = 11770.46 \text{ kg}$ 。故 $F = 11770.46 * 47.85 / 47 = 119833.3 \text{ kg} < 2282000 \text{ kg}$, OK。
13. 若最內側鋼索距右端點 6m, 則其斜長 = $(9^2 + 6^2)^{0.5} = 10.82 \text{ m}$, 因此其所夾之角度 $\theta = \sin^{-1}(9 / 10.82) = 56.28^\circ$ 。
14. 鋼索承擔橋面 6 長之荷重, $W = 9000 * 6 = 54000 \text{ kg}$, 亦即 $F_{AV} = 27000 \text{ kg}$ (橋面兩

側各一條)。

15. 鋼索荷載重+自載重 = $23430 + 1.66 * 10.82 = 23480.46 \text{ kg}$ ，故 $F = 23480.46 * 10.82 / 9 = 23480.4 \text{ kg} > 2282000$ ，OK。
16. 由此可知，自中央塔柱至端點之間距亦不宜相差大，原則上最大以 5m 為宜。
17. 中央塔柱基礎承受之總荷載重 = $\Sigma 2FAV$ 。
18. 鋼索承受之水平分力 $FAh = 28698 * 9 / 10.82 = 23871.1 \text{ kg}$ 。設其受力點至柱底之距離 = 14m，則該水平力對中央塔柱底之力矩 $MAY = 23871.1 * 14 = 33195.4 \text{ kg-m}$ 。
19. 鋼索承受之水平分力 $FAh = 28698 * 9 / 10.8 = 23915.3 \text{ kg}$ 。
20. 設基礎厚度 = 1.0m 底，則該水平力對中央塔基礎底之力矩 $MAZ = 28698 * 15 = 430475.1 \text{ kg-m}$ 。
21. 設中央塔柱左側相對 A 點之力矩 = MAY' ，則所有鋼索對中央塔柱底之力矩 $MY = \Sigma MAY - MAY' = 0$ 。其實中央塔柱左右兩側之應力必然正負抵消，任荷鋼索缺一不可否則早就倒塌。
22. 同理： $MAZ = \Sigma MAZ$ ， $MAZ' = 0$ 。
23. 基礎底土壤承受之載載重 $W = 2 * \Sigma FAV / 1000$ 。若現址之土壤承載力 = 10 T/m^2 ，基礎底面積 = A，安全係數採 1.5，則 $A \geq W / 10 * 1.5$ 。
24. 懸吊水管之應力分析：若懸吊水管之鋼索為 n 根，而且中央支柱至其起點或終點，兩端設計為固定端，則可依結構力學設計手冊所列之公式，左右兩端之反力 $RA = RB = (n - 1) / 2 P$ ，P = 每一間段所懸吊之重量，設其單位重量 = 7810 kg，懸吊之間距等於 5 公尺，則 $P = 9000 * 5 = 45000$

$$\text{kg}。MA = MB = -(n^2 - 1) / 12 n * P * \ell。MC = -(n^2 - 1) / 24 n * P * \ell。$$

25. 若懸吊水管之鋼索為四根，而且中央支柱至其起點或終點，兩端均設計為鉸接，詳如圖 14，則可依結構力學設計手冊[3]所列之公式，左右兩端之反力 $RA = RB = 2P$ ， $M_{max} = MC = 2P * \ell / 5$ ， $MD = 3 * P * \ell / 5$ 。

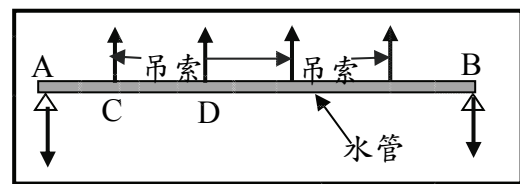


圖 14 懸吊水管作用點示意圖

26. 若懸吊根數極端點支撐之方式與以上所述不同，只好自行依結構力學上之三力矩定律計算之。
27. 三力矩定律公式為： $MA * \ell_1 + 2 * (MA * \ell_1 + MB * \ell_2) + MB * \ell_2 = - 6 * (a_1 * x_1) / \ell_1 - 6 * (a_2 * x_2) / \ell_2$ ，如圖 15 所示。式中之 a_1 ， a_2 ，分別為梁 AB 及 BC 在均佈荷重 ω_1 ，及 ω_2 下，不計反力所產生之力矩圖面積(拋物線形之面積 = $3/8 * \omega * \ell^2$)， x_1 ， x_2 分別為該面積之重心至端點之距離，原則上 = $1/2$ 。若左右對撐，因此 $MA = MB$ ， $a_1 = a_2$ ， $x_1 = x_2$ ， $\ell_1 = \ell_2$ 。 a_1 為荷重 ω 所產生之力矩 $M = \omega * \ell_1 / 2 * \ell_1 / 4 = \omega * \ell_1^2 / 8$ 。其所形成之拋物線面積 = $2/3 \ell_1 * M$ ， $a_1 = 2/3 * (\omega * \ell_1^2 / 8) * \ell_1 = \omega * \ell_1^3 / 12$ ，上式可簡化為 $MA + MB = - \omega * \ell^2 / 6$ 。另設虛梁 AA'，其端點力矩為 MA' ，則 $MA' * \ell_0 + 2(MA' * \ell_0 + MB * \ell_1) + MB * \ell_1 = - 6 * (a_0 * x_0) / \ell_0 - 6 * (a_1 * x_1) / \ell_1$ ，由於 $MA' = 0$ ， $\ell_0 = 0$ 。簡化為 $3MB * \ell_1$



$$= -6(\omega * \ell^3 / 12 * \ell_1 / 2) * \ell_1, M_B = -\omega * \ell^2 / 12$$

代入上式，則 $M_A = -\omega * \ell^2 / 12$

$$= -\omega * \ell^2 / 6, M_A = -\omega * \ell^2 / 12 \text{ T-m}。$$

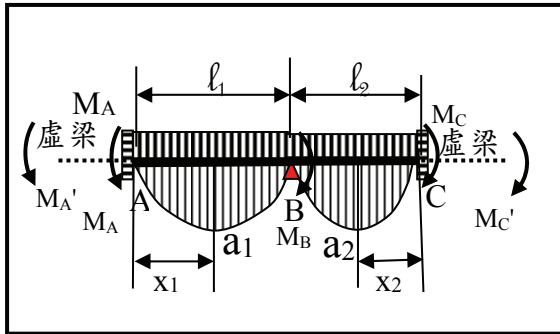


圖 15 連續梁端點力矩示意圖

(五)脊背式斜張橋

- 1.水管敷設在做為維修步道之小鋼管 (4 吋左右)上，詳如圖 16 所示。
- 2.設水管口徑仍採用 3000 mm ϕ ，橋梁跨距 $\ell = 100 \text{ m}$ ，單位載重量 $w = 9000 \text{ kg/m}$ 。脊背式斜張橋正面圖如圖 16，其作用力詳如圖 17。
- 3.脊背鋼索承受之水平力 $F_{Ah} = \Sigma F_{Ah}$ ，垂直力 $F_{Av} = \Sigma F_{Av}$ 。脊背鋼索斜長 $= (5^2 + 9^2)^{0.5} = 10.3 \text{ m}$ ， $F = F_{Ah} * 10.3 / 9$ 。
- 4.脊背式斜張橋支撐柱底端(B 點)承受。

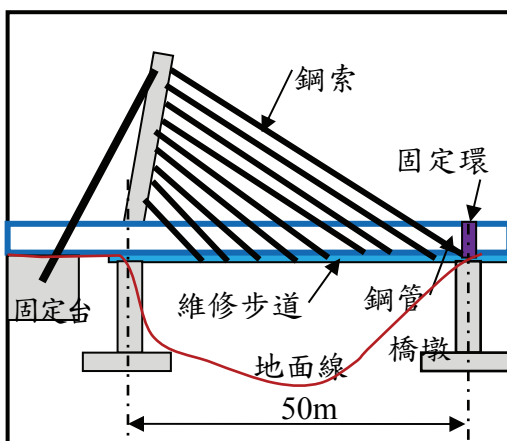


圖 16 斜張橋正面示意圖

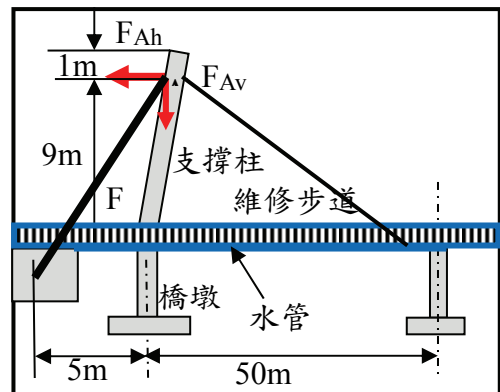


圖 17 斜張橋鋼索力學分析圖

- 5.脊背式斜張橋鋼索右側之作用力分析與上述中央塔柱式斜張橋完全相同，之力矩 $M = \text{鋼索右側之 } \Sigma M - F_{Ah} * 9$ 。
- 6.支撐柱底端(B 點)需要配置鋼筋量 $A_s = M / a_d$ 。
- 7.假設脊背式斜張橋背後採用之鋼索，其斷面積 $= a$ ，而 $F_{Av} = F * 5 / 10.3$ ，原則上 F 以 $1400 * a / 1.5 = 2100a$ 為上限，其餘載重量由其下不之混凝土塊(固定台)承擔。因此該混凝土塊之載重量 W 須大於 $F_{Av} - 2100 a * 9 / 10.3 * 1.5$ 。該混凝土塊之體積 $= W / 2.4$ (混凝土塊之密度須以 2.4 T/m^3)計，因為它仍需配置溫度鋼筋，以對負溫度變所產生之熱脹冷縮)。
- 8.假設脊背式斜張橋背後採用之鋼索承受之拉力等於 22 T ，其夾角 $= \tan^{-1} 15/9 = 29.01^\circ$ ，擇期垂直分力 $F_v = 22 * \cos 29.01^\circ = 11.32 \text{ T}$ 。
- 9.必要時可加計混凝土塊與周邊土壤之磨擦力 $P = 2 * f * H * (L + B)$ ，式中之 f 為混凝土塊

與周邊土壤之磨擦係數，假設 $= 3 \text{ T/m}^2$ ，H 為混凝土塊之高度，B 為其寬度，L 為其長度。 $F=1.1 * 1.2 * 3 = 26 \text{ T}$ 。若安全係數取 2，則其摩擦力 $= 26 / 2 = 13\text{T}$ ，固定台重量可減為 $17/13=4\text{T}$ ，體積減為 $2.4=1.7 \text{ m}^3$ 。

參考文獻

- 1.大口徑輸水管橋設計案例探討：台灣世曦公司。
- 2.建築物耐震設計解說：內政部營建署。
- 3.水管橋的耐震設計範例解說(2002版)：中華民國自來水協會。

4.結構力學設計手冊：清田清司、高須治男原著，江新煌、蔡震邦編譯。

5.技工手冊：陳文海編著，世一文化事業公司2012年5月。

作者簡介

曾浩雄先生

現職：尚潔環境工程公司技師

專長：自來水工程規劃、設計及施工

本刊 109、110 年「每期專題」

期別	主 題	子 題	時程
39 卷 第 4 期	供水服務	1.提昇服務品質、2.資訊管理與應用、3.自動讀表技術應用、4.物聯網及 ICT 技術、5.節約用水及效率措施、6.可持續的水價、7.進階抄表管理系統。	109 年 11 月
40 卷 第 1 期	工程技術	1.工程規設、施工及計劃管理、2.智慧供水技術、3.管線免開挖更生技術、4.環境友善及先進水處理技術、5.創新水源開發技術、6.薄膜技術、7.新興污染物處理技術、8.新興技術。	110 年 2 月
40 卷 第 2 期	營運管理	1.供水設施營運操作、2.供水系統維護管理、3.管線失效故障分析、4.管線狀況評估、5.降低無收益水量、6.集水區保育治理、7.緊急應變及危機管理、8.管網建模及應用。	110 年 5 月

～歡迎各界就上述專題踴躍賜稿，稿酬從優～

纖維加固管道修復技術

文/賴意君

一、前言

目前台灣有數萬公里埋設在地下的主管徑老舊壓力輸水幹管，由於受限於地下管線錯綜複雜及有限的空間，無法開挖汰換。若採用免開挖工法，仍有許多管徑極限及管線特性的局限。同時汰換經費及效率，亦無法追上管線老化的速度。因此，一種廣泛用於橋梁等基礎結構物補強的纖維加固修復技術於近 20 多年來已開始運用在管線的更生工程上。

二、適用於主管徑壓力管道

主管徑埋設的壓力管線連續使用數十年後劣化狀況逐漸加速，威脅到這些管道的結構完整。預力鋼襯混凝土管（PCCP）結構安全很大程度上取決於預力鋼線的強度和長期耐用性，由於這些鋼線因腐蝕或其他因素而斷裂，因此處於爆管高風險狀態。相同於預力鋼襯混凝土管、其他主管徑常用的管材，如鋼管和球墨鑄鐵管也因生命週期的已達中老年期而需要進行結構更新以延長使用壽命。輸水幹管或其他大直徑壓力管的管道修復可以透過纖維加固的管道修復系統進行管內部或管外部修復，以達到資產延壽的目的。

三、纖維加固管道修復系統

(一)特性概述

纖維加固管道修復系統是一種免開挖管道修復技術，能夠提供完整全結構修復這些已經開始劣化的管段。這項 FRP 纖維加固

管道修復系統已在全世界成功使用了二十多年，修復管徑從 900mm 到 5025mm 的管道。目前有一些纖維加固管道修復系統已符合 NSF61 飲用水系統認可之標準。

(二)纖維加固管道維修過程

使用特殊設計的 FRP 層（碳纖維和玻璃纖維）黏合到管道的內表面，可以利用這些 FRP 系統的固化強度，顯著提高劣化不良管道段的環向和軸向強度。纖維複合材料層很薄，完工後管道的內徑減低很少，從而實現了經濟（輸水量降低很少）且最重要的是完全結構化的快速安裝過程。（如圖 1）



圖 1 纖維加固管道維修

(三)纖維加固管道修復系統之功能與優勢

1.纖維加固管道修復系統之功能

- (1)將受損管道恢復到原始設計壓力容量。
- (2)可符合增加內部壓力的要求。
- (3)重新建立管道撓曲加載能力。
- (4)恢復原始的外部承載能力。
- (5)更高的流量提升了輸水能量。

2.纖維加固管道修復系統之優勢

- (1)免開挖工法：避免全面開挖道路和破壞其

他路面設施。

- (2)可分段修復系統：避免使用昂貴的全段汰換工法，例如內套或現場內襯。纖維加固管道修復系統允許僅對劣化管段進行全面的結構修復。
- (3)斷面積損失很少：僅在管道上增加不超過 6.5mm 的厚度，遠小於其他任何修復工法，卻可達到獨立結構的強度。
- (4)修復時效快：允許在最短的時間內（48 至 72 小時）完成緊急維修。
- (5)極佳強度、重量輕、極高成型性：強度約一般鋼材之 2~10 倍，重量約鋼材之 20%，可適用於各種角度成型貼合於管中。。
- (6)不需要重型機械：施工過程中不需要使用重型機械。
- (7)NSF 61 認證：纖維加固修復系統的所有材料，從纖維和底膠到樹脂和複合材料應完全符合 NSF 61 認證。
- (8)耐用性：所有修復系統的設計使用壽命至少為 50 年。FRP 系統的耐用性可通過全面測試及耐候性研究及實際使用壽命證明。
- (9)環保：確保複合系統的 VOC 含量遠低於 EPA 的有害空氣污染物（HAP）允許值。非常適合在狹窄空間（例如管道內部）中工作。

(四)纖維加固修復系統之其他應用

除提高現有 PCCP，RC 和鋼管的結構性能外，還可用於升級其他壓力容器結構性能，例如儲槽。廠中的許多其他結構也可以得到補強，潛在的結構用途包括：

- 1.增加可用環向應力(增加內部壓力能力)。
- 2.洩漏修復與預防。
- 3.防止腐蝕及腐蝕造成的置換強度降低。

4.抗震升級。

5.緊急維修。

6.增加彎曲強度。

7.外部載荷增加而提高抗壓強度。

四、纖維加固管道修復系統案例

(一)州際公路旁的管道修復

本案例相關說明如下：

- 1.業主:美國華盛頓郊區衛生委員會
- 2.日期:2013 年 3 月
- 3.管徑:66 英寸(1676mm)
4. 修復管材:PCCP

2013 年 3 月，華盛頓郊區衛生委員會（WSSC）與第三方檢查公司簽約，進行渦電流檢測(檢測預力鋼線是否斷線)，以評估其 2990 英尺(911m)長的 66 英寸(1676mm) PCCP 管道的狀況。發現檢查的 66 英寸管線的許多管段預力鋼線斷線，在結構上已不健全。這些受損管段中的 13 支位於 270 號州際公路附近。WSSC 進行了可行性研究，確定對於這些受損管段使用傳統明挖拆卸修復工法選項非常不切實際，並與施作纖維加固管道修復系統公司聯繫評估使用碳纖維強化聚合物（CFRP）進行修復損壞的管段。最後業主決定使用 CFRP 修復受損的管段，縮短了施工時間，並立即恢復了使用條件和壓力。(如圖 2)



圖 2 WSSC 66 英吋纖維加固管道維修

(二)計畫鐵路下的管道修復

本案例相關說明如下：

- 1.業主:美國馬里蘭州的霍華德縣
- 2.日期:2006 年
- 3.管徑:36 英吋(914mm)~66 英吋(1676mm)
4. 修復管材:PCCP

美國馬里蘭州的霍華德縣通過西南幹線獲得所需約三分之一的水源供應，該幹線長 10 英里，直徑從 36 英寸到 66 英寸不等。2006 年，由於 CSX 運輸公司計劃在管道上方修建鐵路，霍華德縣對該 3000 英尺(914.4m)的 36 英寸預力混凝土管（PCCP）進行了目視和渦電流檢查。檢查結果管道中的結構缺陷可能導致 PCCP 管發生災難性損壞，從而可能對計劃中的鐵路和現有的三條平行鐵路造成嚴重後果。檢查結果發現 36 英寸管道中有 23 支管段預力鋼線斷線，結構已不安全。可行性評估研究發現傳統的拆卸和更換不良管道的方案將花費四到六個月的時間。霍華德縣評估後採用纖維加固修復系統，在不到一個月的時間且以在傳統工法的修復價格一半來執行完成。在對結構強度不足的管段部分進行全面修復之前，鐵路建設無法通行，修復完成後兩天內就開始了火車軌道的運行。(圖 3)



圖 3 霍華德縣鐵道下 36 英吋纖維加固管道維修

(三)東江水管修復

本案例相關說明如下：

- 1.業主: 香港水務署
- 2.日期:2012 年
- 3.管徑: 1200mm~2300mm
4. 修復管材: PCCP、SP

東江水管是從中國大陸到香港的主要淡水供應管線。在使用多年後，發現現有的水管材質已經惡化，需要進行維修。纖維加固修復系統通過了香港水務部門的嚴格測試，並被證明能夠對全結構和半結構的管道進行修復。東江水管直徑從 1200mm 到 2300mm 不等，長度超過 6 公里的自來水管線採用纖維加固修復系統進行修復。工作範圍包含:調查現有管道狀況、管道修復設計、採用纖維加固修復複合材料系統進行修復。(圖 4)



圖 4 東江水管修復

(四)獅子山隧道水管修復

本案例相關說明如下：

- 1.業主: 香港水務署
- 2.日期:2012 年
- 3.管徑: 1200mm~1500mm
4. 修復管材: SP

修復這個壓力水管是一項非常具有挑

戰性的項目，獅子山隧道內共五個直徑 1200mm 至 1500mm 的水管需要修復，全長 7.5km。繁忙的交通狀況使得無法在隧道區域實施任何長時間的道路封閉，從而使所有傳統的管道修復技術都不可行。纖維加固修復系統輕便，易於操作且無需封路，因此被選作這些自來水管道的內部結構襯裡。工作範圍包含：檢查出口管道狀況、管道修復設計、現有管道內部表面處理、採用纖維加固修復複合材料系統進行修復。(圖 5)



圖 5 獅子山隧道水管修復

五、結論

以往針對的老舊的超大口徑管道，僅能用全開挖汰換的方式解決問題，以維持幹管的安全運行。但礙於經費、現場狀況及汰換的時效，全開挖汰換往往不易執行。透過最新的檢測技術對老劣化的管線進行「管線狀況評估」，從劣化的優先順序中以纖維加固管道修復系統工法進行局部管段修補方式或整管道修復可快速控管老舊管線不可預知的爆管問題。纖維加固管道修復系統工法提供大管徑管理單位另一種對劣化管段修復的新思維及最適合解決方案。

參考網站

相關案例參考網站如下：

- 1.<https://aegion.com/about/resources/case-studies/66-inch-pccp-pipeline-rehabilitation>
- 2.<https://aegion.com/about/resources/case-studies/36-inch-pipeline-rehab-beneath-planned-railroad>
- 3.<http://fyfeasia.com/case-studies/water-applications/hong-kong-pipe-rehab>
- 4.<http://fyfeasia.com/case-studies/water-applications/lion-rock-tunnel>

作者簡介

賴意君

現職：橋豐科技工程經理

專長：管線非開挖工程設計及施工、基礎建設檢監測
工程施工