

Instruments Today 2024 Q4

科儀新知



環境資訊數位化

Digitalization of Environmental Information

【人物專訪】

中央研究院院士 王寶貴 教授

241

ISSN 1019-5440

2025 國研盃 智慧機械競賽

學生競賽國內賽
ASME Taiwan SPDC



[競賽項目]

① Student Design Competition 學生設計競賽

題目 | Assembly Line Sorting and Packaging

② Old Guard Oral Presentation Competition 演講競賽

題目與機械相關即可，英文演講 10 分鐘，無即席問答。

[競賽獎項與獎金] 主辦單位保留依報名狀況調整獎項名額之權利

① 學生設計競賽

第一名 50,000 元 / 第二名 25,000 元 / 第三名 15,000 元
佳作 兩名 5,000 元

② 演講競賽

第一名 10,000 元 / 第二名 5,000 元

[報名時間與方式]

報名時間 | 即日起至 2025 年 3 月 3 日截止。

報名方式 | 線上報名網址 <https://www.tiri.narl.org.tw/ASME>

[競賽時間]

2025.03.15

[競賽地點]

國立清華大學
工程一館

| 主辦單位 |

美國機械工程師學會 台灣分會

國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心

| 承辦單位 |

美國機械工程師學會 清華大學學生分會

美國機械工程師學會 中山大學學生分會

美國機械工程師學會 臺灣大學學生分會

美國機械工程師學會 陽明交通大學學生分會

[聯絡資訊]

ASME 學生競賽 (SPDC) 國內賽

· 總召 / 李承昱 email : leeyee0729@gmail.com

· 副召 / 陳芯如 email : rubygaga904@gmail.com

林展宏 email : jkasl930212@gmail.com



[報名連結]

詳情請上 Facebook 搜尋

f ASME SPDC 台灣國內賽 | Q

Mitutoyo

以精密量測技術貢獻社會

NEW
Products



▲ 座標測定機

更多詳細資料



光學尺 ▶



NEW
Products



◀ 現場型
座標測定機

NEW
Products



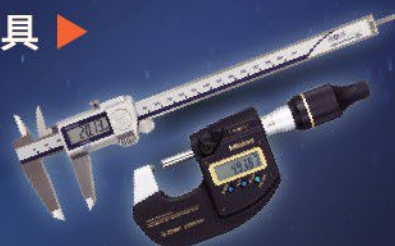
輪廓形狀
及表面
粗度測定機 ▶

NEW
Products



◀ 高精度CNC
影像測定機

測定工具 ▶



35th

傳承 創新 跨越

台灣三豐儀器
www.mitutoyo.com.tw

GMM

均華精密工業股份有限公司

Gallant Micro. Machining Co., Ltd.

(股票代號：6640)

2010

總部成立於土城工業區內

主要從事半導體相關生產設備及模具之研發、製造及銷售。
主力產品>>精密取放技術之晶粒挑揀機與黏晶機、精密加工技術之沖切成型機與自動封膠機、光電整合技術之雷射刻印機與光學檢測機等。

2018

正式掛牌上櫃(6640)

均華不斷致力新製程需求的設備研發，深受客戶肯定。開發先進的封裝設備關鍵技術，也結合國外關鍵模組廠商技術優勢，以優異的整合能力憑藉有限資源發揮最大研發成果，因而建立良好的獲利基礎。更因長年的技術積累，相關核心技術亦居於國內相關產業之領先地位。

半導體先進封裝、異質整合

主要商品/服務項目

半導體先進封裝精密取放設備設計、製造、銷售
自動雷射刻印機、自動沖切成型機設計、製造、銷售
精密模具及機械設備之設計、製造、銷售

歡迎各界菁英加入 共創產業未來



★完善的獎勵

年終獎金、員工分紅(視公司年度營運狀況、個人績效表現分發) / 三節禮金 / 生日禮金

★完善教育訓練

新進人員基礎訓練(師徒制) / 強化研發技術能量(內部教育訓練課程) / 個人潛能提升課程

★完整的保險福利

勞工保險 / 勞工退休金(新制) / 全民健康保險 / 公司團體保險(壽險、意外傷害險、意外醫療險、住院醫療險、癌症醫療險) / 員工及眷屬保險(提供優惠方案給予眷屬納保)

★休假

有薪病假3天 / 生理假 / 產檢假 / 陪產假

★職工福利

公司及福委會提供結婚禮金、生育禮金、喪葬補助金 / 員工家庭日 / 部門聚餐、歲末尾牙餐會 / 員工健康檢查 / 哺乳室 / 職工福利委員會特約廠商優惠 / 員工子女獎助學金 / 提供書刊及雜誌借閱 / 國內外旅遊



GMM

236 新北市土城區民生街2-1號
TEL : 02-2268-2216 FAX : 02-2268-0665

302 新竹縣竹北市台元一街8號7樓之9
TEL : 03-5601222 FAX : 03-5601292



高科技領導廠商

CONTREL

東捷科技



專注研發核心技術

自動化整廠規劃與製程設備

雷射應用設備

光學檢測設備

物流規劃與設備

真空製程設備

巨量轉移/巨量修補設備

以研發為主的設備製造商
專注於新型雷射應用與雷射微加工技術

擅長LCD製程設備整合整廠自動化

近年將技術應用擴展至 (micro) LED及半導體產業

為國內高科技領導廠商!

完善服務網絡・服務據點在地化
維修保養、定期設備調校、客戶問題即時對應!

WWW.CONTREL.COM.TW

☎ 06-5051188(台南總公司) 📍 服務據點:新竹.台中.台南.高雄

關注東捷



CNC控制器・自動化控制器・ 機械手臂・雲端 整合方案



ONE FOR ALL
ALL IN SYNTEC

最值得信任的電控夥伴

新代科技股份有限公司
SYNTEC Technology Co., Ltd.

台灣新竹市東區研發二路25號

☎ 886-3-6663553
☎ 886-3-6663505

✉ sales@syntecclub.com.tw



SYNTEC



LEANTEC



LINE

HIWIN®

實現您的智慧工廠

HIWIN 為工業 4.0 提供高附加價值的整體解決方案
全方位系列產品，實現您的智慧工廠。



關節式機器手臂
Articulated Robot



史卡拉機器手臂
SCARA Robot



晶圓機器人
Wafer Robot



晶圓移載系統
EFEM



智慧型滾珠螺桿
Intelligent 4.0 Ballscrew
智慧型線性滑軌
Intelligent 4.0 Guideway



諧波減速機
DATORKER® Strain Wave Gear
旋轉致動器
DATORKER® Strain Wave Gear System



RCH系列



RCV系列



RAS系列

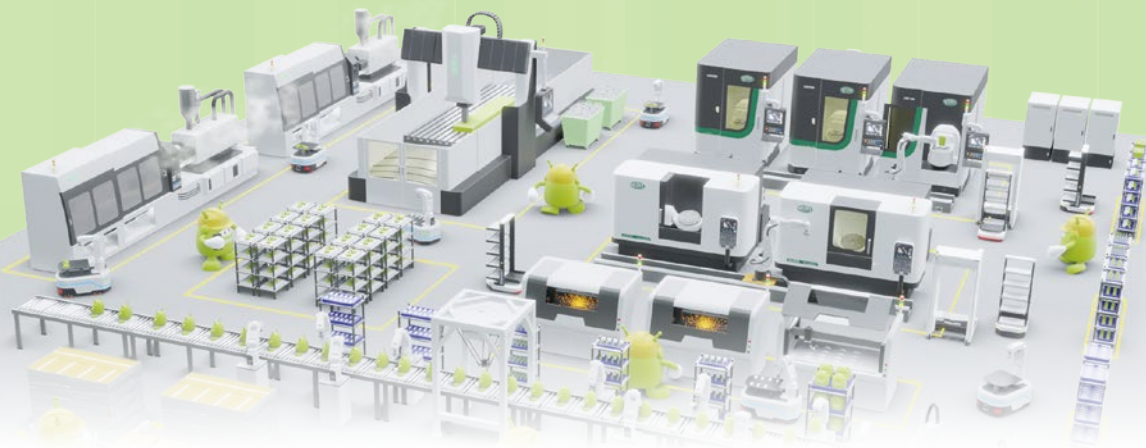


RAB系列

Torque Motor 迴轉工作台
Torque Motor Rotary Table



了解更多
HIWIN產品



全球營運總部

上銀科技股份有限公司
HIWIN TECHNOLOGIES CORP.
台中市40852精密機械園區精科路7號
Tel : (04) 2359-4510
www.hiwin.tw
business@hiwin.tw

關係企業

大銀微系統股份有限公司
HIWIN MIKROSYSTEM CORP.
台中市40852精密機械園區精科中路6號
Tel : (04) 2355-0110
www.hiwinmikro.tw
business@hiwinmikro.tw

全球銷售暨服務據點

德國 www.hiwin.de	日本 www.hiwin.co.jp	美國 www.hiwin.us	義大利 www.hiwin.it
瑞士 www.hiwin.ch	捷克 www.hiwin.cz	法國 www.hiwin.fr	新加坡 www.hiwin.sg
韓國 www.hiwin.kr	中國 www.hiwin.cn	以色列 www.mega-fabs.com	

TILTdot

無線傾斜儀

TILTdot 為一款具有 NB-IoT 無線傳輸功能之無線傾斜儀，同時提供雙軸向角度及溫度量測功能。

TILTdot 具有堅固的防水外箱及低耗電量的設計，使用2顆 18650 鋰電池可提供長時間量測記錄及資料上傳至 dot雲端網頁服務，其內建 32 GB Micro SD卡可備份儲存一佰萬筆以上資料。

- 大樓結構物傾斜監測
- 捷運、高鐵、橋梁等墩柱傾斜監測
- 捷運、高鐵等隧道結構傾斜監測
- 邊坡擋土牆傾斜監測
- 地表滑動監測



都市土木新建工程



河川水利工程



橋梁工程



邊坡安全



pALERT F330

一體化力平衡式地震儀

擁有高精度的三軸力平衡加速度計，擁有早期警報技術和先進功能，用於全面的地震防備。提供三種觸發邏輯 (Pd, PGA, STA/LTA) 和過濾選項，包括高通濾波器和低通濾波器，以減少非自然地震噪音。

- 地震預警系統(EEWS)
- 結構健康監測(SHM)
- 工業風險管理增強
- 生產線地震安全停機機制



住宅建築



工業基礎設施



製造廠



公共設施





我們矢志成為光電及半導體產業中，
真空設備核心技術提供者。

我們目標是整合高科技產業真空設備
元件，提供有信賴感的產品，登上全
球領導品牌。

磁流液軸封



特點

- 台灣設計/製造
- 高度密封性與高潔淨度
- 可依需求進行客製化設計
- 可提供維修服務
- [選配] 軸封洩漏檢知系統

接觸角影像分析儀



應用領域

- 生物相容性研究
- 奈米抗撥水表面驗證
- 玻璃基板潔淨度驗證
- 晶圓潔淨度管制
- HMDS製程管制
- 光阻與顯影製程開發
- BGA接合點潔淨度驗證
- 封裝接合面前處理



快速升溫/退火爐
(RTP/RTCVD)



AS-One 100



直接液體注入
(DLI)模組

VAPBOX 300

KEMSTREAM
ADVANCED VAPORIZERS ●●●

科儀新知

INSTRUMENTS TODAY 季刊

中華民國 113 年 12 月 31 日出版



封面說明

為提供學研界感測元件開發與後續商品化介接，台灣儀器科技研究中心團隊研發「微型化氣體感測器公板系統」。透過該系統感測元件（感測端與加熱端）與公板進行黏合，即可提供氣體感測元件加熱控制與感測電阻值擷取，透過後端韌體進行電訊號與氣體濃度變化轉換，可在不同應用情境下進行數據蒐集與分析。公板系統體積僅有骰子般大小（ $17 \times 17 \times 17 \text{ mm}^3$ ），搭配微型鋰電池，通訊方式使用藍牙 5.1，平均可使用超過兩小時。無線通訊與加熱器整體功耗範圍約 10 mW，因此可透過有線方式進行電力供應，或搭載小型太陽能板進行長時間持續運作，以利達成低成本且廣泛佈點目標。（圖片為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心所提供）

• 發行人：潘正堂

• 客座主編：周崇光

• 執行編輯：林麗娥、陳柏荔、魏崇倫

• E-mail：tiri-editor@narlabs.org.tw

• 網址：<http://www.tiri.narl.org.tw/Publication/InstTdy>

• 地址：新竹市科學園區研發六路 20 號

中華民國 68 年元月創刊

• 電話：(03) 5779911 轉 304, 313

• 傳真：(03) 5789343

• 設計排版：宇豐廣告實業社

• 電話：(03) 5306633

國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心出版

241 科儀新知

中華民國 113 年 12 月



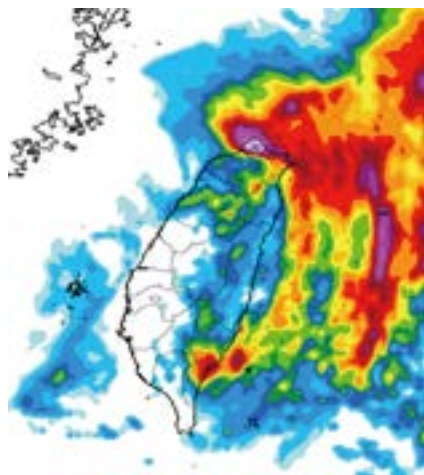
30

人物專訪

- 4 中央研究院院士－王寶貴教授
才思用盡時、就買個儀器 (做實驗或會有新發現)
林麗娥

環境資訊數位化

- 13 「環境資訊數位化」專題介紹
周崇光
- 15 深度學習：環境資料數位化的應用
邱普運、王韻婷、林雋傑、劉佳儀、張佑文、張斐章
- 27 大氣邊界層觀測、模擬技術與資料同化
鄭芳怡、王聖翔、楊舒芝
- 39 Deep-QPF：應用雷達觀測於臺灣深度學習短時降雨預報
陳柏孚
- 49 民生公共物聯網資料服務平台環境資訊數位化
游輝宏、陳威宇、孫振凱
- 65 微型感測器讀取電路與系統
林奕成、蔡淑如、陳柔甄、蕭文澤、陳峰志
- 75 高光譜應用於農業與水域的檢測
李龍正、申雍
- ## 科儀專欄
- 83 鋰電池防爆預警檢測之研究
宜千鈺、王聖璋、蕭育仁
- ## 科普大觀園
- 95 光的指揮家－探索光學薄膜的奧秘
陳柏荔、莊子右、陳宏彬



40

INSTRUMENTS TODAY

December 2024

People

- 4** **Dr. Pao-Kuan Wang, Academicians of Academia Sinica
When Run Out of Ideas, Buy Equipment.**

Claire Lin

Special Issue: Digitalization of Environmental Information

- 13** **Special Issue Introduction of "Digitalization of Environmental
Information"**

Charles C.-K. Chou

- 15** **Deep Learning: Applications in the Digitization of
Environmental Data**

Pu-Yun Kow, Yun-Ting Wang, Jun-Jie Lin, Jia-Yi Liou, Yu-Wen Chang, Fi-
John Chang

- 27** **Atmospheric Boundary Layer Observation, Modeling and
Data Assimilation**

Fang-Yi Cheng, Sheng-Hsiang Wang, Shu-Chih Yang

- 39** **Deep-QPF: Deep Learning for Radar-based Rainfall
Nowcasting in Taiwan**

Buo-Fu Chen

- 49** **Digitization and Visualization of Environmental
Information on the Civil IoT Taiwan Data Service Platform**

Hui-Hung Yu, Wei-Yu Chen, Chen-Kai Sun

- 65** **Micro Sensor Readout Circuits and Systems**

Yi-Cheng Lin, Shu-Ju Tsai, Rou-Jhen Chen, Wen-Tse Hsiao, Fong-Zhi Chen

- 75** **Hyperspectral Sensing in Agriculture and Water Areas**

Long-Jeng Lee, Yuan Shen

Column

- 83** **Research on Lithium Battery Explosion-proof Early
Warning Detection**

Qian-Yu Yi, Sheng-Chang Wang, Yu-Jen Hsiao

Popular Science

- 95** **Conductor of the Light - Explore the Secrets of Optical
Thin Film**

Po-Li Chen, Tzu-Yu Chuang, Hung-Pin Chen



91



99



中央研究院院士

王寶貫 教授

才思用盡時、就買個儀器 (做實驗或會有新發現)

When Run Out of Ideas, Buy Equipment.

撰文：林麗娥

AI 與數位化技術能夠分析和處理大量數據，提供精確的氣候預測和環境監測，因此在面對氣候變遷中扮演著關鍵角色，緣此《科儀新知》241 期推出「環境資訊數位化」專題，介紹各式環境預警與管理氣候變遷的技術。許多天氣的變化，都與大氣層中各種不同的物理過程有著密切的關係，只要抬頭觀測雲，就可以多少預知未來的天氣變化。本期人物專訪特別邀請在國際上以研究雲物理著稱，特別是雲中冰相粒子定量化研究，現任中央研究院院士—王寶貫教授。瞭解王院士是如何從兒時對中國古典文學的浸潤產生問題意識，應用雲物理等所學，進行歷史氣候研究，成功推算漢元帝時期極端氣候的成因。除此之外，王院士亦與讀者分享他為何「叛逆選擇」做實驗研究，從動手實驗中獲得樂趣與成就感。

好奇心驅使的創客魂

王寶貫院士從小具備旺盛的好奇心與求知欲，儘管只是生活中的尋常現象，他仍然充滿好奇，特別是對雲、對天文很有興趣，總想著雲上面是不是真的像書中所寫的，有巨人、公主住著。早期臺灣買不到天文望遠鏡，為了滿足對天文的好奇，王院士在高中的時候就開始研究如何自己組裝。一開始買了玻璃來自己磨鏡片，但效果不佳，後來還試了廢船上的探照燈鏡片，最後是在臺北市天文館買了日本製鏡頭、在五金行買塑膠水管來充當鏡筒，焦距也自己量。

起初父親也不相信院士真的可以成功，最後在院士的設計調配以及父親的巧手協助之下，還真的做出可以清楚看到月球表面的天文遠望鏡。臺灣因為地震關係，房子很容易出現裂縫，小時候家裡住的是三層樓，一下大雨，雨水就會從裂縫中流下來，所以常常要拿水桶來承接雨水，有時某處滴完還會換其他地方滴水，所以水桶要一直更換位置。院士仔細觀察漏雨的情形，就拿膠帶把一些裂縫貼起來，然後讓膠帶垂下來，就可以把雨滴順勢導引到水桶裡來，如此一下雨，水就不會到處亂滴。

王院士於 1971 年自國立臺灣大學大氣科學系大學畢業時，是班上唯一通過預官考試的空軍氣象官。院士開心地笑著說：「完成受訓進行抽籤分發地點時，我很幸運地抽到台北市公館空軍氣象中心，但是我前面一個抽到東引、後面一個抽到東沙…」當時空軍與美軍有緊密合作關係，美軍會固定將人造衛星雲圖資料傳真到空軍氣象中心，儘管是黑白的、解析度也不好，院士已經看得津津有味。後來在中心閱覽室看到美國海軍出版的《氣象衛星手冊》，當時氣象衛星尚在快速發展中，手冊中的雲圖比傳真雲圖解析度高得多，心想如果可以擁有這本書該有多好。他看到書上註明如果想要這本書可以寫個 Request Letter，於是院士寫了封航空信去試試，結果美國海軍還真的將書寄給他，讓他驚喜不已。



左圖：王寶貫院士就讀臺大大氣系學生時期(1970)、右圖：任職空軍氣象中心時期(1972)。

院士在氣象中心當預官時，看了幾篇美國研究論文後，發現未來可以利用電腦做數值天氣預報，認為這是未來重要科技，於是自告奮勇要在每星期四召開的預報檢討會中報告分享這個心得。電腦在臺灣當時才剛開始使用，在座人員都認為用電腦計算天氣預報是天方夜譚。沒想到，發展至今，電腦數值天氣預報不但天天在運用，且已邁向長時間的氣候預測。

到美國叛逆選擇做實驗、研究雲物理

王院士就讀臺大大氣系時，鮮少有讓學生動手做實驗的訓練課程，有的話，也是簡單的觀測，所謂的利用儀器做實驗，不外乎放放探測氣球，清理一下氣壓計之類。由於缺乏實驗的訓練與經驗，那時候從臺灣畢業到美國加州大學洛杉磯分校 (University of California, Los Angeles, UCLA) 大氣科學學系的留學生，清一色都是都是做理論研究，只有院士決定要投入雲的實驗研究。剛進入 UCLA 大氣系就讀時，有個新生面談，其中一位面談教授 Dr. Akio Arakawa (荒川昭夫) 問王院士：「據我所知，臺灣來的學生都是做理論的，你確定要做雲的研究？要做實驗會很辛苦唷！」儘管 Arakawa 這樣提醒，王院士還是鍾情於自己的興趣，也因為王院士的堅持，成為開創深對流系統影響對流層與平流層相互作用研究領域的國際先鋒。

多年後回到臺灣巧遇同樣畢業於 UCLA 大氣系的前交通部中央氣象局－鄭明典局長，鄭局長與王院士分享：「您對研究上的「叛逆」聲名遠播，我的指導教授 Dr. Michio Yanai (柳井迪雄) 開玩笑地問我說：你們知不知道那個王寶貫是做實驗的」。

做實驗、才會發現藏在細節裡的魔鬼

王院士為了要把雲研究透徹，於是投入 Dr. Hans R. Pruppacher 教授門下，只是甫到 UCLA，就碰到指導教授在歐洲車禍住院，一時回不來，所以在 UCLA 的第一年都是由同門學長 Dr. Kenneth V. Beard 代為指導，於是跟著學長一起作雨滴清除大氣中氣溶膠的實驗。大氣中氣溶膠的去除有很大部分要靠大氣的降雨來掃除。如果氣溶膠帶電則更容易被帶相反



王寶貫院士與論文指導老師普魯帕克 (Hans R. Pruppacher) 教授攝於他的德國家中。

電荷的降雨粒子掃除。像是放射性氣溶膠顆粒就會由於 β 衰變而自帶電。因此，為了準確了解氣溶膠對環境及健康影響，就必須了解不同降雨情形的帶電狀態。只是氣溶膠粒子的質量和直徑非常小，大約 10^{-11} 克、0.5微米左右。

院士表示到美國念書第一個衝擊就是「題目在那邊，但你必須自己想出辦法怎麼研究、怎麼量測」。為了正確量出氣溶膠的大小及質量，王院士問 Beard 有沒有電子顯微鏡、核子反應器，Beard 說在工學院就有掃描式電子顯微鏡，也有穿透式顯微鏡、地下室則是有核子反應器。院士驚嘆地表示：「在美國做研究，要什麼有什麼，真是太棒了」，但也意味著在臺灣鮮少做實驗的王院士必須從頭學習如何操作這些儀器設備。

到美國唸書的第一年，可能是英語表達能力不是很好，王院士儘管看得出 Beard 的實驗哪個環節出了問題，卻無法向他說清楚，實驗也無進展。研究進行到第二年，學長拿到教職工作，實驗就由院士接手。院士跟指導教授表示：「給我兩個禮拜，我應該可以展示可行性。」因為知道問題所在，王院士花了不到三天就完成展示，也把之前實驗室做不出來的「使氣溶膠均勻帶電」的實驗給完成了。

王院士表示，假如氣溶膠的帶電量很小而流速太快時，即使在電場中有路徑偏移，也不易量到，所以在實驗中要放慢氣溶膠的流速。另外，為了讓氣溶膠均勻帶電，必須使用高壓電，因為高壓電會使空氣游離，產生電暈放電現象。但 Beard 的實驗直接讓氣溶膠通過高壓電極，帶正電的氣溶膠會被吸附在負電極的金屬圈上、而帶負電的氣溶膠則被吸附在正電極金屬絲上，剩下通過的氣溶膠就是幾乎沒有帶電的，所以學長的實驗才會無法成功。院士的方法是讓氮氣流過電暈區，讓正、負離子與氣溶膠在另一個容器中均勻混合，而不是讓氣溶膠直接通過電暈區。只是做實驗，哪有不受傷、不感到挫折的。院士表示他做完氣溶膠帶電的實驗，儘管有做好絕緣保護措施，但是身上還是會帶電，手指跟牆壁稍微碰到一下，指尖還會迸出閃電，這種微電擊還超痛的。



左圖：王寶貫院士與大學長 Kenneth Beard 博士 (後來為伊利諾大學香檳分校教授) 在 UCLA 實驗室合影 (1974)、右圖：與同研究群同仁在科羅拉多的博爾德 (Boulder) 參加雲物理大會 (1976)。

相較於做理論研究的同學，每跑一個程式就有數以萬計的數據可供分析，院士則花費了兩年時間，才好不容易獲得「兩點」數據。而且做實驗過程很容易出錯、甚至錯誤的地方完全出乎意料。王院士問說：「如果水放在冰箱 0°C 就會結冰，但在大氣中有時氣溫零下 20°C 還是維持水的狀態，這是所謂的過冷水。但是你會相信室溫 10°C 時，水居然也會結冰嗎？」院士表示，實驗所收集的雨滴和氣溶膠樣本須先放在玻璃瓶裡面，在送進原子反應爐前，要把玻璃瓶放在真空乾燥器皿裡面抽成真空以利蒸發乾燥。沒想到抽了真空之後，上面的水竟然結成了一層冰，水結成冰之後，體積膨脹，擠破玻璃管，花了兩三個禮拜時間收集好的樣本就泡湯了，整個實驗就要重來。原來當快速抽真空時，液面蒸發非常快、潛熱也散得非常快，所以液面周圍空氣變得非常冷，水就在那瞬間結冰了。

「如果不是真的做實驗，我還會不相信居然有這種現象發生！」院士既做實驗、也做理論研究，了解各自的優點。實驗中有很多意外的發現，往往讓你一輩子忘不了。德國有句俚語：「魔鬼藏在細節裡」，原意指「細小的地方也會藏有神蹟」，也就是任何事情的細節都可能藏有發現，往往實驗的成敗都是在細微末節中，甚至挑戰了我們以為「正確」的科學理論。

亞洲第一人獲得歐洲尼可萊·鐸切克獎

王院士所提出的雲頂重力波碎波理論 (Gravity Wave Breaking Theory)，對劇烈天氣預報和氣候模擬有重要貢獻，於 2023 年榮獲歐洲劇烈風暴實驗室 (European Severe Storms Laboratory, ESSL) 最高榮譽獎項－尼可萊·鐸切克獎 (Nikolai Dotzek Award)，是臺灣大氣學界首次獲頒歐洲跨國氣象研究組織獎項，也是亞洲第一位獲此殊榮者。



王寶貫院士在羅馬尼亞首都布加勒斯特 (Bucharest) 獲頒尼可萊·鐸切克獎 (Nikolai Dotzek Award) (2023)。

王院士表示最早發現平流層上也有雲的奇特現象，是由一位捷克學者在 1991 年發現。其後這位捷克學者與一位同樣受 Pruppacher 教授指導而認識的義大利籍學者在 1995 年做了更進一步的衛星影像分析。地球被大氣圈包圍著，隨著高度不同，分為對流層、平流層、中氣層與熱氣層。對流層頂上方的平流層的熱力學結構會壓制對流層任何物質的上傳，是傳統氣象學公認的穩定層。而且平流層是眾所周知的乾燥氣層，一般測量到的水蒸氣濃度大約是 2 至 3 ppm 左右，就算這樣的水蒸氣全部凝結成冰晶，也不可能形成衛星雲圖上廣大的雲帶，因此，產生那條雲帶的水蒸氣一定不是原先就存在於平流層裡。

後來院士發現重力波的碎波機制 (breaking of gravity wave) 可以使水蒸氣穿透對流層頂。碎波 (wave breaking) 就是平常我們在海邊看到衝浪高手恣意滑行其上的翻天巨浪。普通水波的運動只是把波的形式往外移動而已，而碎波是水分子的淨位移。碎波產生後，水分子已經不能自動復歸原位。應用這個原理到雷暴雲頂的重力波與碎波現象，王院士得到這樣的結論：如果雲頂的重力波不發生碎波，則那裡的水蒸氣只是「隨波浮沉」，最終還是留在對流層，不會穿越對流層頂。但是一團雷暴在其成熟期會有相當強烈的上升氣流，中緯度的雷暴最強上升氣流甚至可高達 60–70 m/s。這樣的上升氣流雖然不足以如火山爆發或核彈爆炸一般衝破對流層頂，卻足以把原來安靜平直的對流層頂攪出很大的波動，這種波便是重力波 (gravity waves)，在適當情況下，這些重力波會產生碎波而穿透對流層頂，把水蒸氣及冰晶輸送到平流層。這種碎波現象對天氣及氣候系統有重要的影響。

已故芝加哥大學教授藤田哲也 (Tetsuya Fujita) 是著名的雷暴觀測專家，對劇烈天氣現象諸如強烈雷暴、龍捲風之研究有卓著的貢獻，現今美國的龍捲風等級制度便是他創設的，稱之為 Fujita Scale (藤田等級，簡稱 F-scale)。藤田曾觀測到一種特殊現象，他將其稱為「跳卷雲」(jumping cirrus)，「每當過衝雲頂猛烈崩垮到砧狀雲裡時，就會有卷雲形成，從過衝雲頂的後方往上跳起來。」。藤田的觀測與說法在那個年代遭受到很多人的質疑，實際上藤田的跳卷雲其實便是雷暴雲頂的碎波，只是他在世時尚無法完美解釋，後來一一被王院士證實了。王院士後來到芝加哥大學演講時，藤田教授的同事跟院士表示，如果藤田還在世一定會非常感謝您證實了他的理論。風趣的院士跟對方開玩笑說：「I know, 你如果碰到他幫我告訴他…」



王寶貫院士與夫人曾麗碧女士攝於德國班姆堡 (Bamberg) 的宏博高等研究獎 (Humboldt Senior Research Award) 頒獎典禮 (1993)。

讀聖賢古書有助於歷史氣候研究

有別於學科領域的刻板印象，王院士的科學探究不僅僅是以雲物理的研究聞名，也「跨領域」從古代文獻中尋找線索，歸納出中國古代歷史氣候變化的成因。院士對於古代文學的認識與興趣奠基在父親的收藏。他回憶說：「父親開工廠，很喜歡教人唸書，工廠的工人晚上都要聽父親用臺語教四書五經」。院士從三、四歲就開始旁聽，從小就會用臺語背誦四書五經。先是背誦，然後對照書上的文字，所以從小就認得很多字。父親還有一本上海書局出版的《辭海》，不用父親教，院士自己研究之後就懂得怎麼查閱字典。「父親收藏的書沒有時間看，都是我在幫他看！」大量閱讀後，甚至父親讀不懂的地方，院士都可以理解，還可以向父親解釋。

王院士小時候讀古文時一直有個疑問：「為什麼古人都說冬雷是妖？為什麼冬天打雷不祥？」直到 1978 年王院士獲得博士學位後，先留在 UCLA 從事兩年的博士後研究，主要是研究雨滴與二氧化硫的反應，同時也開始利用中國古代文獻來研究古代的氣候，才得到解答。那時他看到中國氣象學者竺可楨作的研究，談中國五千年氣候變遷，利用古代文獻中「物候」現象的資料，像是通常燕子應該某一天到，但今年燕子比較晚到，可能就代表今年氣候比較冷。若今年河水異常結冰，也表示氣候較冷，藉此拼湊出中國歷史上氣溫演變曲線。透過氣候變遷的線索來試圖了解為什麼唐朝貞觀是盛世而明朝末年卻是亂世。

為此王院士翻找二十四史，把過去兩千年中每 30 年的冬雷次數統計出來。最初猜想，冬天打雷應該是在比較溫暖的年份，因為溫暖期可能對流比較旺盛，產生雷雨，就會打雷。沒想到，把冬雷變化曲線跟竺可楨的溫度曲線一比之下，跟院士預期的剛好相反--冬雷多的時候，都是冷的年份。為什麼冷的年份容易出現冬雷？目前還沒有定論，王院士有個暫時的解釋認為：冬天產生雷雨，表示對流旺盛，但這個對流不一定是「熱對流」，很可能是冷鋒的對流。冷鋒附近，對流本來就比較強，如果冷鋒後面的冷氣團特別冷，冷暖的對比特別強，在氣象上「斜壓性」強，容易造成「斜壓不穩定」。斜壓不穩定，容易造成強的對流，比較有可能造成雷雨。因此古人認為「冬天打雷不祥」是因為冬雷出現的反常，表示該年天氣特別寒冷所以認為不祥。

院士席中也與我們分享他最近歷史氣候研究的發表，分享前，院士幽默地問《科儀新知》採訪團隊：「你們知道漢元帝是誰嗎？」「一般人都想不起他是誰，但如果我跟你說，就是把王昭君嫁到匈奴的那一位，你就會有印象了」。原來院士小時候讀漢書時發現《漢書·五行志下之下》裡面記載：「漢元帝永光元年四月，日色青白，亡景，正中時有景亡光。是夏寒，至九月，日乃有光。」當時對「夏寒」的描述印象非常深刻，因為在中國的歷史記錄中，用「寒」來描述夏季的情況是相當不尋常，嚴重的悖離常態，只是他一直沒有找到正確的解答方式。

多年後從 McConnell 等人於 2020 年發表的火山考古研究中¹，利用最新定年技術，發現公元前 43 年年初阿拉斯加奧克莫克 (Okmok) 火山有一個非常劇烈大規模的火山爆發，而永光元年就是公元前 43 年。王院士興奮地說：「Bingo！找到答案了」。火山爆發是塑造全球氣候變遷的重要外因，王院士團隊將《漢書·五行志下之下》中的氣候記錄進行了準確的

1. McConnell, J. R., Sigl, M., Plunkett, G., Burke, A., Kim, W. M., Raible, C. C., Wilson, A. I., Manning, J. G., Ludlow F., Chellman, N. J., Innes, H. M., Yang, Z., Larsen, J. F., Schaefer, J. R., Kipfstuhl, S., Mojtavavi, S., Wilhelms, F., Opel, T., Meyer, H., and Steffensen, J. P., "Extreme climate after massive eruption of Alaska's Okmok volcano in 43 BCE and effects on the late Roman Republic and Ptolemaic Kingdom", *P. Nat. Acad. Sci.*, 117 (27), pp.15443-15449, (2020).

年代測定，形成完整的因果鏈，確認是奧克莫克強烈火山輻射強迫下，造成該年夏天明顯的降溫。整個研究於今 (2024) 年以「Extreme climate after massive eruption of Alaska's Okmok volcano in 43 BCE and effects on the late Roman Republic and Ptolemaic Kingdom」為題，發表在 *Climate of the Past* 期刊中。²

東西方學生各有優點

王院士於 1980－2016 年擔任美國威斯康辛大學麥迪遜分校 (University of Wisconsin-Madison) 大氣與海洋科學系教授，1994－1997 年成為該系系主任。有趣的是，院士初到威斯康辛大學大氣與海洋科學系時，本來預想應該是要他開設「雲物理」的課程，沒想到系主任說「動力學」缺師資，希望他可以去上，雖然動力學不是他的專長，但也懂一些，所以還是硬著頭皮開了這門課。後來才知道原先開這門課的兩位德國籍教授大有來頭，是二次大戰後被送到美國的德軍戰俘。一個是德國萊比錫大學研究大氣邊界層的知名學者 Dr. Heinz Lettau，一個是因為天氣預報很準確被希特勒升為德軍最高氣象長官 Dr. Werner Schwerdtfeger。後來王院士還將 Schwerdtfeger 1943－1945 年間擔任德軍氣象中心-Zentral Wetterdienst Gruppe 最高長官的回憶錄，進行譯作，篇名為《二次大戰氣象秘史「Z-W-G 的最後兩年」——一位德軍高級氣象長官的自述》刊登在空軍刊物《氣象預報與分析》。

王院士在 2003 年回國擔任中研院環境變遷研究中心特聘研究員兼主任，2018 年當選中研院數理組院士，在臺灣大學、中央大學與成功大學等校均開過課，教育啟發無數東、西方學子。他在威斯康辛大學收的第二位博士生 Dr. Jerry Straka，後來成為俄克拉荷馬大學 (University of Oklahoma) 教授，是全世界第一位作三維雲模式包含冰研究的專家。

回到臺灣為了推廣臺灣雲物理的發展，讓學生看看他在美國做實驗所拍、真正雲形成過程的實驗影片，王院士有一年在臺大開設了一門：「深對流雲過程」課程。這門課程是臺灣大學大氣系第一次開的暑期課程，也開放給中央大學的學生來選修。可能由於是第一次開暑期課、在選課設定可能沒有設定好，許多人誤以為是科普課，結果沒有限制外系來修課，光是臺大的學生就有三十幾個學生選課，學生有來自大氣系、中文系、政治系等系所，但是學生加退選時間已過，所以加上中央大學來旁聽的學生，總共就有四十幾個學生上課，他只好硬著頭皮當科普課教，而且為此還換了大教室上課。

院士過去寫了很多科普的文章推廣，用淺顯的方式讓學生了解課程內容，對他來說並非難事，只是學生來自各系，要給學生出題考試就要比較花心思了。期末考他出了一題出自唐代杜牧的《念昔游三首》之一：「雲門寺外逢猛雨，林黑山高雨腳長。曾奉郊宮為近侍，分明攬攬羽林槍。」要學生詳論這首詩所描述是哪一種降雨類型、什麼樣的天氣。沒想到，答題最好的是一位中文系的女生，儘管大氣系學生也回答的很好，但多半侷限在所學的理論範圍。這位女同學則是把文學脈絡與課堂上教的雲物理融為一體，把詩中描述的降雨型態及對流過程寫成一篇常人都能理解的文章，有些像古代科舉的策論。這讓王院士感嘆，古代科舉以詩賦策論取士，從文中觀察考生綜合各項知識的能力來做為任命官吏的基礎，有其一定基於經驗的道理，並非一無是處，現代人不應用今日眼光一竿子打翻一條船而盲目批評。

2. Wang, P. K., Lin, E. K. H., Lin, Y. S., Lee, C. R., Lin, H. J., Chen, C. W., & Pai, P. L., "Possible impact of the 43BCE Okmok volcanic eruption in Alaska on the climate of China as revealed in historical documents", *Climate of the Past*, 20 (7), pp.1513-1520, (2024).

給儀科中心 50 歲的生日祝福

王院士在威斯康辛大學麥迪遜分校大氣海洋科學系任教時，與創系的兩位教授：Dr. Reid A. Bryson 及 Dr. Verner E. Suomi 都有很不錯的互動。Bryson 為氣候專家，著有《Climates of Hunger》，經常與 Bryson 討論利用地質、考古、環境資料來研究古代氣候。Suomi 則被譽為「氣象衛星之父」，NASA 為了紀念 Suomi 的貢獻，將 2011 年發射的地球觀測衛星，改名為 Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP)。院士以 Suomi 曾經對他講的一句話來比喻儀器對科學發展的重要性：「When run out of ideas, buy equipment. (當你研究做到山窮水盡沒有靈感時，就去買個儀器做實驗吧！)」，這句話乍聽起來是個玩笑話，然而理論的正確性必須受到儀器實驗的檢驗，利用實驗的結果來驗證未經證明的物理理論或歸納出新的物理定律。好比超弦理論，未經驗證的理論只能算是「假說」而非「原理」。而有些實驗是設計來驗證理論的，而有些實驗則是用來觀察前所未有的領域，而兩者的成果往往會得出一些完全超乎意料的結果來，這些新結果又往往成為科學大進展的新基礎。

因此，理論和儀器實驗兩者相輔相成，關係著國家科學研究持續發展與成就。期望國家可以重視儀器的新發展，尤其現在的研究都需要大尺度、大規模的實驗去驗證，而儀科中心正是擔負國家前瞻研究的重要責任與支柱。而問題解決的歷程，往往來自不同領域的結合，期勉儀科中心同仁發展多元興趣，大膽走出自己的原專長領域，向寬廣燦爛的科學之門邁進。



威斯康辛大學大氣海洋科學系 50 週年歷屆系主任合影 (1998)。中間執拐杖者為創系人布萊森 (Reid Bryson) 教授。右起第三人持拐杖者是文中提到的德國教授 Dr. Heinz Lettau。

「環境資訊數位化」專題介紹

Special Issue Introduction of “Digitalization of Environmental Information”

客座主編－周崇光 博士

中央研究院環境變遷研究中心副主任

天氣愈來愈熱，是我們最普遍感受到的氣候變遷。只是氣候變遷不單只是出現高溫，還有像是暴雨、洪災、熱浪、野火、空氣污染等。溫室氣體導致的全球暖化以及氣候變遷問題就在眼前，我們一方面要預防致災性天氣造成的損失，一方面也要防止生活環境品質的降低。透過 AI 與數位化技術來分析和處理大量數據，將有助於更精確地掌握氣象和環境變遷的趨勢。緣此《科儀新知》241 期推出「環境資訊數位化」專題，介紹各式環境預警與風險管理的技術。

許多天氣的變化都與大氣層中各種不同的物理過程有著密切的關係，本期人物專訪特別邀請在國際上以研究雲物理著稱，亞洲首位獲得歐洲劇烈風暴實驗室最高榮譽獎項－尼可萊·鐸切克獎 (Nikolai Dotzek Award) 的中央研究院院士－王寶貫教授。透過專訪，瞭解王院士如何細心關照日常事務，善用自己興趣與所學發掘問題、解決問題。

本期首先收錄之文章為國立臺灣大學生物環境系統工程所張斐章特聘教授團隊以「深度學習：環境資料數位化的應用」為題，介紹團隊應用深度學習技術於空氣污染、雨水下水道水位及微氣候預測，成功證明了 AI 模型在這些環境議題中的應用潛力。國立中央大學大氣科學系鄭芳怡教授聯合其他兩位老師，共同撰寫「大氣邊界層觀測、模擬技術與資料同化」，系統性地介紹觀測技術、數值模擬和資料同化在大氣邊界層研究中的進展，以加深對邊界層的理解並提升其預報能力。國立臺灣大學氣候天氣災害研究中心陳柏孚副研究員的「Deep-QPF：應用雷達觀測於臺灣深度學習短時降雨預報」專文，介紹了由臺大氣候天氣災害研究中心與中央氣象署共組之合作研究團隊所發展的 AI Deep-QPF 即時降雨預報技術，該 AI 模型能每 10 分鐘更新預報一次未來 3 小時全臺及鄰近海域範圍內之降雨趨勢以及小時累積雨量，協助氣象預報員及防災人員掌握最新的天氣情報，以提升對致災性降雨的監控和預警能力。國研院國網中心游輝宏副研究員等則於「民生公共物聯網資料服務平台環境資訊數位化」一文中介紹國網中心於「前瞻基礎建設-數位建設」的民生公共物聯網計畫中，如何建置「資料服務平台」，蒐集與儲存各部會針對空氣品質、地震、水資源以及災防等領域所建置的感測資料，並研發相關環境資訊數位化服務。

智慧城市的整體方案中，各式的感測器是不可或缺的關鍵元素，未來更可結合物聯網打造 AIoT 方案，建立即時環境安全監測網路。國研院儀科中心陳峰志副主任團隊推動之「微型感測器讀取電路與系統」專案，建立了氣體感測器公板系統，強調可配合不同材料特性的響應變化需求，從而提升對多種氣體的檢測精度與穩定性，進行電阻值變化的精準量測與校

正，提供學研界感測元件開發與後續商品化介接。國研院儀科中心李龍正研究員則是以「高光譜應用於農業與水域的檢測」介紹儀科中心應用高光譜技術於精準農業及水域監測的研究工作，在碳匯研究、盤點固碳植物、減緩全球暖化時程等研究上，高光譜影像極具應用潛力。

環境資訊數位化能夠提供我們即時且精確的資料，因此在發展氣候變遷調適策略及提升環境品質上扮演著關鍵角色。盼透過本期作者群深入淺出的介紹下，激發讀者新的研究想法與方向，結合人類具備的科學理解、技術和政治經濟力量，建立預測模式、改善環境品質、進而提升我們的生活福祉。

深度學習：環境資料數位化的應用

Deep Learning: Applications in the Digitization of Environmental Data

邱普運、王韻婷、林雋傑、劉佳儀、張佑文、張斐章

Pu-Yun Kow, Yun-Ting Wang, Jun-Jie Lin, Jia-Yi Liou, Yu-Wen Chang, Fi-John Chang

深度學習能精準捕捉資料中的非線性特徵和劇烈變化，實現高精度預測。本研究將其應用於多個環境議題，包括全臺灣的空氣污染、臺北市的下水道水位預測及溫室微氣候預測。空污預測使用了全臺灣環保署測站的歷史資料，涵蓋六個污染因子和兩個氣象因子，模型引入了注意力機制，成功解決傳統深度學習的梯度消失問題，顯著提升未來 72 小時的預測精度，誤差 (root-mean-square error, RMSE) 在 8.5 至 $13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間。在臺北市的下水道水位預測中，本研究採用了 DNN-AE 模型，能穩定預測未來 10 至 60 分鐘水位。在所有 DNN-AE 模型中，C-AE 模型在結構上更具優勢，卷積層能有效提取時間特徵，特別是在處理時間變化資料時，能捕捉更細緻的趨勢，顯著提高預測精度，誤差 (RMSE) 在 T+1 至 T+6 為 0.21 至 0.51 m ，預測結果最佳且穩定。對於溫室微氣候預測，本研究使用 XGBoost 對彰化伸港各微氣候因子進行特徵篩選，分析了溫度、相對濕度和光照強度等關鍵影響因素。結果顯示影響溫度、相對濕度和光照強度的主要特徵分別為溫度、短波輻射 (日射量) 和 RH，反映了捲簾和遮蔽系統對溫室內部微氣候的影響。結果顯示，ANFIS 模型在溫度預測方面表現最佳， R^2 值超過 0.8 ，CNN 則在相對濕度與光照強度的預測上表現良好。綜合這些應用，臺灣的環境預測技術將能進一步推動智慧城市的發展，邁向更高階的數位化未來。

Deep learning accurately captures nonlinear features and sharp changes in data, enabling high-precision predictions. This study applies it to several environmental issues, including air pollution forecasting, sewer water level forecasting in Taipei, and greenhouse microclimate forecasting. For air pollution, historical data from the Environmental Protection Agency station from whole Taiwan, including six pollution and two meteorological factors, were used. The model's attention mechanism effectively solved the vanishing gradient problem, significantly improving 72-hour forecast accuracy, with RMSE errors ranging from 8.5 to $13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In sewer water level forecasting for Taipei, a DNN-AE model was employed, providing stable forecasts for 10 to 60 minutes into the future. Among the models, the C-AE model demonstrated structural advantages, as its convolutional layers efficiently extracted temporal features, especially when handling time-varying data. It improved forecasting accuracy, with RMSE errors ranging from 0.21 to 0.51 meters from T+1 to T+6, yielding the most accurate and stable results. For greenhouse microclimate

forecasting in Shengang, Changhua, XGBoost was used to select features like TSF for temperature, SWI for shortwave radiation and RH for relative humidity, reflecting the effects of rolling curtains and shading systems. The ANFIS model performed best in temperature forecasting, with an R^2 value exceeding 0.8, while CNN excelled in forecasting humidity and light intensity. By integrating these applications, Taiwan's environmental forecasting technology will further drive the development of digital cities, moving towards a smarter and more advanced future.

一、深度學習與其在環境議題上之應用

隨著科技進步與大數據的崛起，人工智慧 (artificial intelligence, AI) 和深度學習 (deep learning, DL) 技術在各領域的應用日益廣泛，傳統的物理模型雖然具備一定的理論基礎，但其高昂的運算成本與複雜的參數調整，限制了即時預測的能力。與此同時，AI 技術憑藉其強大的數據處理能力與預測精度，展現出顯著的優勢，成為現代環境科學研究的重要工具。因此，本研究的應用主要的環境應用有三個議題，分別：空氣污染、地表水文及溫室微氣候預測。

1.1 空氣污染之應用

空氣污染模式主要分為大氣擴散模型以及資料驅動模型。大氣擴散模型是基於對 $PM_{2.5}$ 生成、傳輸和轉化的物理過程的深入理解，通過數學方程來描述這些過程，這種模型的優點在於具有較強的解釋性。然而，大氣擴散機制模型包含大量的參數，這些參數的校正需要大量的觀測資料和專業知識，且校正結果也難以驗證。此外，NCDR (2022) 曾指出 CMAQ 模型目前只能做到每六個小時提供一次預報，過去研究結果反映出大氣擴散機制模型的計算量巨大，需要高性能的計算器，限制了其在即時預測中的應用 (Grell et al., 2005)。大氣擴散機制模型對大氣過程的描述往往過於簡化，無法準確地捕捉大氣環境複雜的相互作用。大氣環境是一個極其複雜的系統，受到多種因素的影響，如氣象條件、排放源、地形地貌等 (Goliff et al., 2013; Zong et al., 2018)。

近年，隨著電腦硬體的突破以及監測系統的完善，更容易取得詳細的空氣污染觀測資料，為訓練深度學習模型提供了豐富的素材 (Taye, 2023)。深度學習的應用方向包括了結合不同神經網路架構的混合模型，例如卷積神經網路(convolutional neural network, CNN)、長短期記憶 (long short-term memory, LSTM) 和門控迴圈單元(gated recurrent unit, GRU)。這些模型在掌握 $PM_{2.5}$ 的時間和空間變化趨勢表現出更高的準確性 (Hu et al., 2023)。

1.2 地表水文之應用

地表水在水文循環中對人類生活至關重要，直接影響水資源管理、環境保護和城市安全，是水文學研究的核心議題之一。早期研究主要依賴物理模式，通過數學公式和物理機制模擬水從降水到地表逕流的過程，如 SWAT 模型常被用於大範圍流域的逕流和水質問題 (Arnold et al., 1998)。然而，Beven (2012) 指出，物理模式運算成本高，尤其在大規模流域模擬中，難以即時提供資料且準確度有限。研究顯示，機器學習 (machine learning, ML) 和深度學習技術在短期預測上的準確性優於傳統物理模式 (Mosavi et al., 2018)。過去，Kratzert et al. (2018) 曾用 LSTM 模型成功預測大範圍流域的河川流量。此外，AI 技術還可以與物理模式結合，進一步提升預測的準確性 (Zhang et al., 2008)。

隨著全球都市化加劇，都市防洪成為一大挑戰，因為不透水面積增加，降雨後逕流量上升，導致洪災風險上升 (Fletcher et al., 2013)。AI 技術能夠在洪水管理中結合即時數據進行準確的預測，提前發出預警，幫助決策者採取應對措施，從而減少洪災的影響。Chang et al. (2002) 指出應用混合式的機器學習及 PCA 模式對於區域淹水的議題有著顯著的效果。

1.3 溫室微氣候之應用

過往研究指出，溫室內的微氣候，如溫度、濕度和光照對作物的生長及產量有顯著影響 (Katsoulas and Kittas, 2008; Lin et al., 2024; Ma et al., 2019; Shi et al., 2024)。傳統溫室操作依賴農民經驗，難以應對微氣候短期波動，導致無法持續維持理想的生長條件。精準農業透過 IoT 設備和感測器來監測並控制環境，提升生產效率並減少環境影響 (Shafi et al., 2019; Wakchaure et al., 2023)，但高昂成本和技術接受度的問題，造成在小農經濟體中難以推廣 (Rajak et al., 2023)。因此，經濟上可行的短期預測對穩定溫室環境至關重要 (Gharghory, 2020; Kow et al., 2022; Li et al., 2024)。

目前，機器學習已在溫室微氣候預測方面取得進展。Li et al. (2024) 提出了基於注意力機制的 LSTM 方法來準確預測溫室內空氣和土壤溫度。Kow et al. (2024a) 提出混合深度學習模型，不須使用 IoT 資料即可用於多時間稽延和多因子預測。Sun and Chang (2023) 則開發了 DF-RF-ANN 混合模型，利用動態因子模型和倒傳遞類神經網路預測微氣候變化，幫助小農應對極端氣候，以達成永續發展目標 (SDGs)。

二、研究方法

2.1 深度學習與類神經網路

深度學習是機器學習的子領域，模仿人類大腦的結構和功能進行資料分析與決策，其基礎是類神經網路，由多層神經元組成，每層神經元接收前一層輸入，經過處理後傳遞至下一層，這種多層結構使深度學習具備強大的特徵學習能力。深度學習的優勢在於自動從大量資料中提取高層次特徵，於圖像識別、語音辨識、自然語言處理等領域表現出色。相比傳統機器學習，深度學習減少人工特徵萃取，能藉由大量資料自我優化，提升預測準確性和泛化能力。

2.2 注意力機制類神經網路

本研究提出了一種基於注意力機制 (attention) 的模型，注意力機制為 ChatGPT 的核心模型，已開始被應用在不同的環境議題 (Kow et al., 2024a; Sun et al., 2024)。注意力機制層的特點在於，每個變數都會生成對應的查詢向量 (query)、鍵向量 (key) 和數值向量 (value)。其中，query 的作用是匹配其他變數生成的 key，進而計算出一個初始的注意力分數，本文將其命名為矩陣「a」，a 矩陣會與 value 相乘，最終得出注意力機制的分數 (attention score)。注意力機制的主要功能是學習各個輸入變數之間的關聯性，以克服 LSTM 模型只能學習單一序列時間變化的問題。

2.3 卷積神經網路

卷積神經網路 (CNN) 屬於深度學習中一種常見的監督式前饋網路，網路架構主要包含卷積層 (convolutional layer)、池化層 (pooling layer) 與全連結層，CNN 透過卷積層萃取輸入

數據的局部特徵，再以池化層壓縮特徵以降低維度，可避免全連接層中參數過多、過度擬合的問題，經過反覆卷積與池化運算後，可建立 CNN 模式擷取特徵後的資訊與輸出值間的非線性關係，因此在圖像分類領域被廣泛應用 (Kow et al., 2022b)。本研究將使用 CNN 模式於時間序列資料，透過卷積層擷取資料的時間特性。

2.4 長短期記憶體類神經網路

長短期記憶體 (LSTM) 是一種著名的回饋式神經網路 (recurrent neural network, RNN)，其特點是能夠將過去的資訊回饋至模型的訓練過程中，以提升預測的精度 (Zhou et al., 2019; Kow et al., 2024b)。LSTM 包括三個關鍵的閥門：輸入閥門、遺忘閥門和輸出閥門，這三個閥門使 LSTM 能夠模擬具有記憶能力的神經網路，同時擁有長期和短期記憶的特性。

2.5 自編碼器

自編碼器 (autoencoder, AE) 是一種非監督式學習模型，可以分為編碼器 (encoder) 與解碼器 (decoder) 兩個部分，編碼器可以萃取資料的特徵，將資料轉換為低維度編碼，解碼器則負責將這些編碼重建還原為原始數據，AE 的目標是使還原後的數據與原始數據盡可能相似，常用於數據降維、特徵學習和數據去噪。過去研究曾應用 AE 模式對高維度的水文資料進行降維度之後，輸入到 LSTM 模式進行多時刻預測 (Kao et al., 2020; Kao et al., 2021)。

2.6 調適性網路模糊推論系統

調適性網路模糊推論系統 (adaptive network fuzzy inference system, ANFIS) 是基於模糊推論系統 (fuzzy inference systems, FIS) 的架構，結合類神經網路自我組織的特性來自動調整模糊規則參數 (Jang, 1993)。FIS 使用模糊化的 IF-THEN 規則來描述和分析人類推理過程，而 ANFIS 通過學習功能解決實際應用中規則設計和參數調整的問題。ANFIS 分為 5 層：第一層將輸入變數映射到模糊集合；第二層根據模糊集合進行運算；第三層正規化輸出；第四層進行推論；第五層綜合輸出結果 (Kow et al., 2023; 張斐章 and 張麗秋, 2015)。

2.7 eXtreme Gradient Boosting (XGBoost)

XGBoost 基於 Gradient Boosting，並增加了特徵隨機採樣、正則化以及並行處理等特點，進一步提升模型的性能和穩定性 (Chang et al., 2023)。透過增益 (gain)、覆蓋率 (cover) 和頻率 (frequency) 三種方式對輸入特徵進行評分和排序，能有效的篩選特徵，以解決研究中輸入特徵過多的問題，提升後續預測模型的演算效率 (Li et al., 2022; Osman et al., 2021)。

2.8 誤差指標

本研究使用決定係數 (R^2) 和均方根誤差 (RMSE) 作為模型性能指標，並引入平均絕對誤差 (MAE)，進一步評估模型的預測能力。其中，當 R^2 數值越接近 1，表示模型能夠更有效地捕捉目標資料的變化，說明模型具有較高的解釋力，反之靠近 0 為表現越糟糕。MAE 可衡量預測值與實際值之間的平均絕對差異，數值越接近於 0 表明預測值與真實值越接近。相較於 RMSE，MAE 不會放大極端誤差的影響，因此適合用於評估模型在整體上的預測穩定性；而 RMSE 由於有平方項，因此會把誤差較大的地方放大。綜合 R^2 、RMSE 和 MAE 這三個指標，可以更全面且客觀地評估模型的解釋力和預測準確性。

三、各問題的資料敘述以及對於深度學習的應用成果

3.1 空氣污染

(a) 資料統計與所應用到的模式架構圖

本研究的研究區域為全臺灣的空氣污染測站，共有 76 個測站。為了要更方便探討模式在各個區域的精確度，本研究將模式的表現分成四個區域比較討論。圖 1 顯示各區域空氣污染的資料統計結果，從統計結果可以觀察到，臺灣南部區域的 $PM_{2.5}$ 濃度最高且污染物變化很劇烈，其次為中部，這是因為中部與南部有大面積的重工業區以及火力發電廠，因此造成了嚴重的空氣污染；北部的 $PM_{2.5}$ 濃度排在中間，該區域主要為商業區， $PM_{2.5}$ 多來自於人為污染排放或是汽機車排放；東部則是以旅遊業為主且較少人類活動，因此空氣污染排放為全臺灣最低。

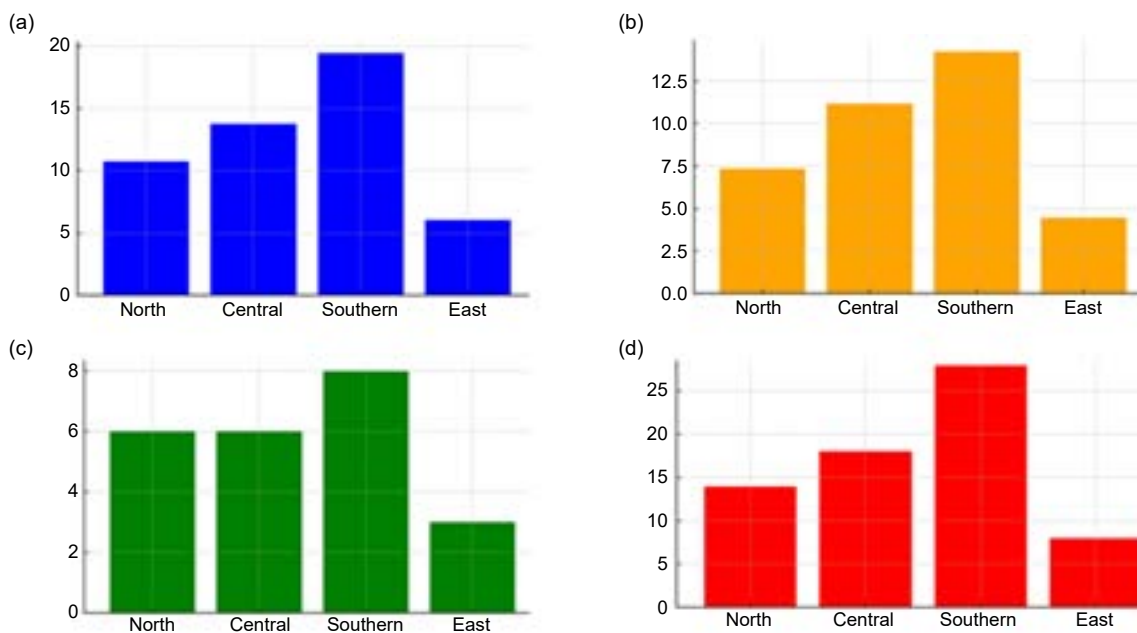


圖 1. 臺灣四個區域 $PM_{2.5}$ 統計值 (a) 平均值 (b) 標準差 (c) 下四分位數 (d) 上四分位數。

本研究所使用的模式架構如圖 2 所示，注意力機制模型的架構是由數層注意力層的模式所組成。模型的輸入為過去 72 小時的資料，包含空氣污染使用組成 AQI 指標的六個主要因子 (如： $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , CO)，以及兩個氣象因子 (溫度與相對濕度)，模型的輸出為未來 72 小時預測 $PM_{2.5}$ 的濃度。

(b) 空氣污染預測成果

圖 3 顯示了空氣污染的預測結果，本研究比較了注意力機制 (attention) 模型以及長短期記憶體 (LSTM) 模型的預報。Attention 模型的誤差比 LSTM 模型更小，證明了它可以有效地從不同時距的資料學習到非線性的關聯性，因此克服了深度學習所造成的梯度消失問題，提升了模式的預測精度。若比較訓練與測試的預測結果可以看出，整體而言測試的誤差比訓練更高，隨著預測時距越長 (從 $T+1$ 至 $T+72$)，誤差越大，這是因為模式的不確定性會提



圖 2. 模型架構流程圖。

升。比較不同區域的預測結果，顯示南部的誤差最大，其次為中部及北部，東部的誤差為全臺最小。誤差的表現與 3.1(a) 章節的統計結果有高度的相關性。其中，圖 3(c) 及 (d) 顯示，當 $PM_{2.5}$ 的平均值與標準差越高，模式的預測不確定性也越高，因此造成誤差越大，二者之間的相關性介於 $R^2 = 0.6$ 至 0.99 。

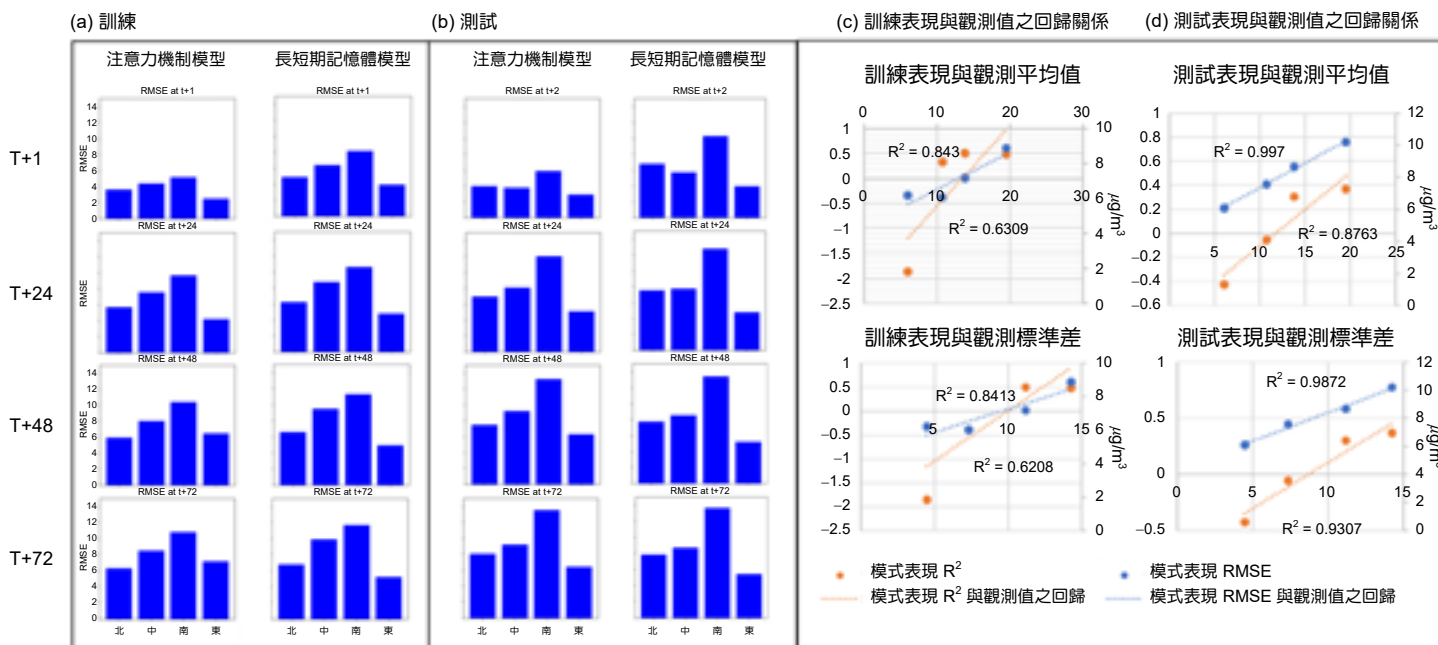


圖 3. 臺灣四個區域 $PM_{2.5}$ 空氣污染預測誤差 (RMSE) 的結果 (a) 訓練 (b) 測試 (c) 訓練表現 (d) 測試表現與觀測值之回歸關係。

3.2 雨水下水道水位

(a) 研究區域與資料收集

臺北市受到盆地地形的影響，在冬季周圍的山地與丘陵容易形成地形雨，而夏季則因為上升氣流旺盛，經常出現午後雷陣雨與颱風，近年來受到氣候變遷的影響，短延時強降雨越趨頻繁，雨量容易超過雨水下水道設計保護標準 (每小時 78.8 毫米)，導致低窪地區因排水不及而發生淹水災情。因此，針對雨水下水道水位之研究，選定臺北市的圓山、中山、新生與建國抽水站集水區為研究區域，總面積為 1981 公頃，涵蓋大同、中山、松山與大安等

行政區，四個抽水站集水區之排水系統皆排入基隆河。整體而言，研究區域地形平坦，僅新生、建國集水區上游地區與圓山集水區部分地區地勢較高。透過臺北市政府資料開放平台 (<https://data.taipei/index>) 網頁蒐集研究區域周邊雨量站共 11 站與雨水下水道水位站共 19 站，分布位置如圖 4 所示。



圖 4. 雨水下水道水位研究區域圖。

(b) 雨水下水道水位預報成果

本研究結合自編碼器 (AutoEncoder, AE) 與深度神經網路 (deep neural network, DNN) 提出新穎的深度學習模型 (DNN-AE)，AE 能有效降維高維度資料，而 DNN 能在降維後的特徵中進行更高精度的預測，這種結合能顯著減少計算資源並提高預測準確性，使用 DNN-AE 模式建立下水道水位多時刻預測模式，整體架構示意圖如圖 5 所示，首先以 AE 模式建置下水道水位降維還原模式，AE 模式之 encoder 部分可將 19 站的下水道水位資料降維成編碼 (code)，再使用 DNN 針對降維後的下水道水位特徵編碼建立預測模式，將以 CNN、BPNN 與 LSTM 分別建模，輸入資料皆使用研究區域周邊 11 個雨量站前時刻的雨量資料 (T-3-T)

與特徵編碼 (T-6-T)，以進行未來時刻各特徵編碼之預測，最後將所預測之特徵值套配至 AE 模式之 decoder 部分，即可進行未來 10 (T+1) 到 60 分鐘 (T+6) 的水位預測，並比較三種模式之預測結果。

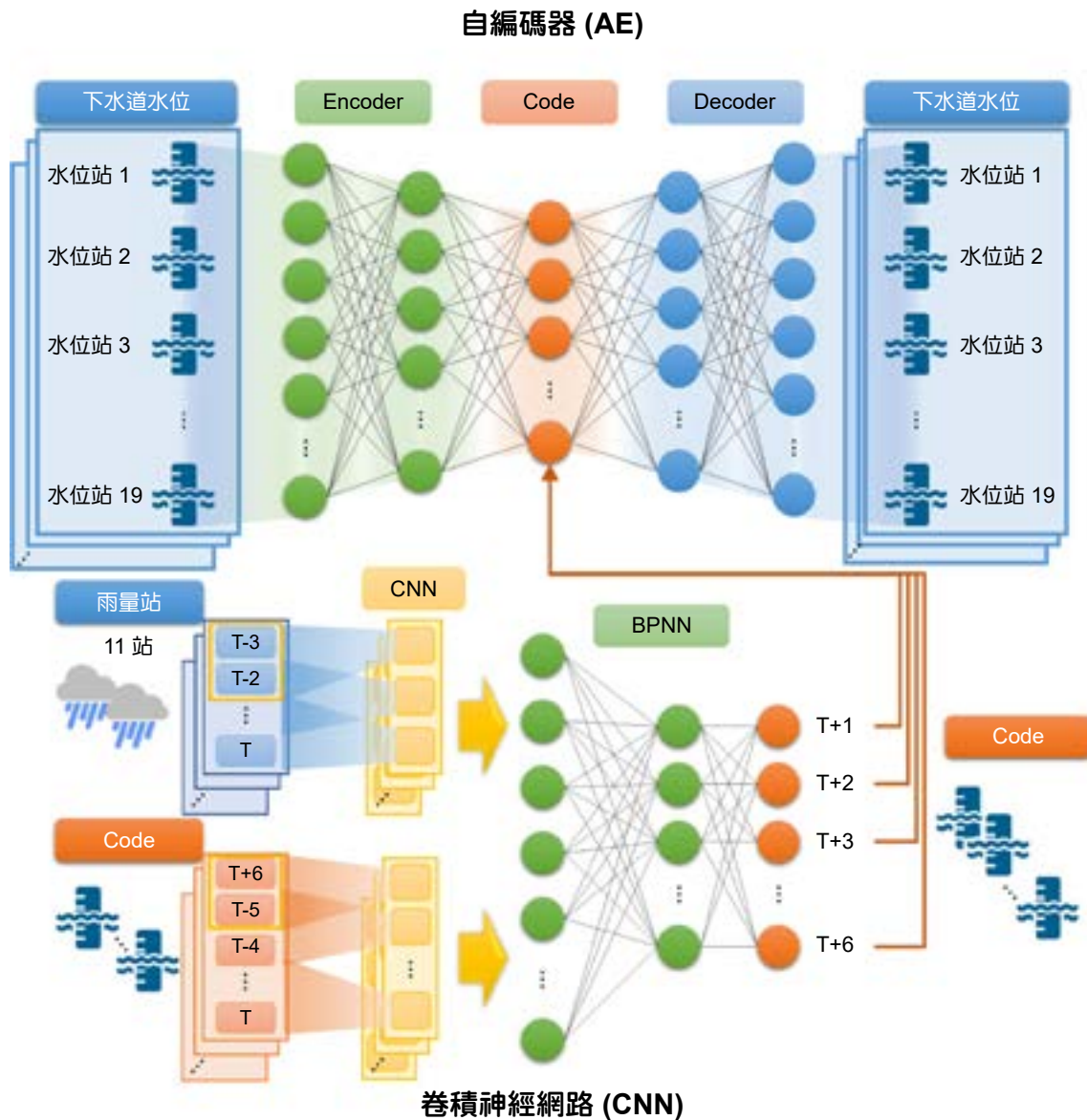


圖 5. 雨水下水道水位預測模式架構圖。

特徵編碼預測模式 CNN、BPNN 與 LSTM 結合下水道水位降維還原 AE 模式，組合成三個 DNN-AE 模式，分別為 C-AE、B-AE 與 L-AE 模式。將 19 站下水道水位之未來 10 (T+1) 到 60 分鐘 (T+6) 預測，計算各模式平均下水道水位預測結果列於表 1，由 T+1 至 T+6 之 RMSE 結果可以發現，C-AE 與 B-AE 模式隨著預測時距越長 RMSE 有逐漸變大的勢，RMSE 介於 0.21 至 0.51 m 之間，有較穩定之預測結果，而 L-AE 模式之 RMSE 在 T+1 至 T+6 數值呈現大小不穩定變動之情形，RMSE 介於 0.24 至 0.54 m 之間，顯示 L-AE 預測結果較差且不穩定；比較訓練與測試結果可以發現，在訓練階段 B-AE 較 C-AE 模式之 RMSE 小約 0.02 m，在測試階段時則是 C-AE 比 B-AE 模式預測結果稍微好一些，且隨著預測時距

越長 C-AE 與 B-AE 模式之預測結果差異越明顯，由此可以得知 C-AE 模式，因為有卷積層擷取連續時間特徵，使長時間預測仍有較佳且穩定的表現；而 B-AE 模式由於全連結層的架構，在訓練時權重充分學習輸入與輸出間的關係，但在測試時有過度擬合的情況。圖 6 為測試階段 C-AE 模式於新生 10 下水道水位站 T+1 之預測結果，可以看出 C-AE 模式能夠掌握水位的變化趨勢，僅在峰值有些微提早延後的情況。

表 1. 平均下水道水位預測結果比較。

評估指標	預測時距	訓練			測試		
		C-AE	B-AE	L-AE	C-AE	B-AE	L-AE
RMSE (m)	T+1	0.47	0.45	0.47	0.22	0.21	0.30
	T+2	0.48	0.46	0.49	0.23	0.26	0.24
	T+3	0.49	0.46	0.54	0.25	0.24	0.45
	T+4	0.50	0.47	0.52	0.25	0.29	0.24
	T+5	0.50	0.47	0.49	0.26	0.31	0.28
	T+6	0.51	0.48	0.51	0.26	0.33	0.46

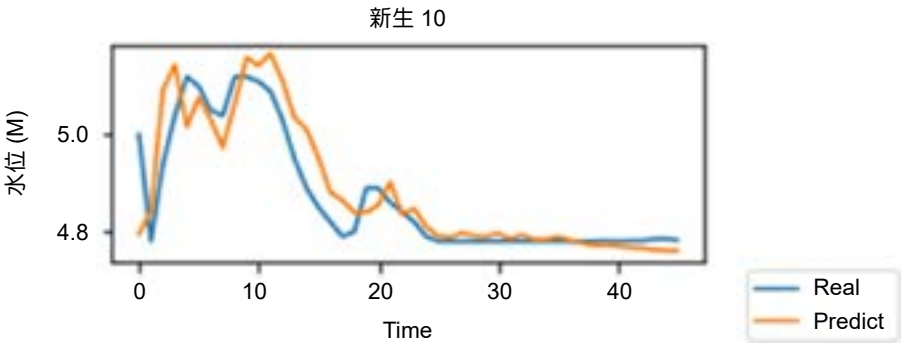


圖 6. 新生 10 下水道水位站 T+1 測試階段預測結果序列圖。

3.3 溫室微氣候預報

(a) 研究區域與資料

研究區域位於彰化伸港的一座強固型開頂溫室，設備包括內遮蔭、四面捲簾和屋頂。本研究使用了三個資料集，分別是中央氣象署 (Central Weather Administration, CWA) 提供的網格天氣預報資料 ($3 \times 3 \text{ m}^2$)、溫室操作資料和溫室內部 IoT 記錄，資料收集期間為 2020 年 4 月 1 日至 10 月 16 日，本研究將所有資料時間尺度統一為 1 小時。以 CWA 網格預報資料及溫室操作資料，預測未來 3 小時溫室內的氣象條件，包括溫度 ($^{\circ}\text{C}$)、相對濕度 (%)、光照強度 (W/m^2)。

本研究旨在找出最適合溫室微氣候預測的模型，由於模型輸入數據種類繁多，且搭配時間稽延數據，導致模型運算成本增加，因此先使用 XGBoost 進行初步特徵篩選，以提高模型效率。本研究選用了卷積神經網路 (CNN)、長短期記憶網路 (LSTM) 和自適應神經模糊推理系統 (ANFIS) 進行溫室內微氣候的預測。CNN 擅長提取空間特徵，LSTM 在時間序列數據處理上表現優異，而 ANFIS 則能有效處理數據中的不確定性。這些模型的性能通過對比分析，找出最適合溫室微氣候預測的最佳模型，以應對溫室內部環境調節的需求。

(b) 溫室微氣候預報成果

表 2 顯示 XGBoost 對各目標因子篩選出的前八個特徵，篩選方式是對各特徵進行時間稽延 (T~T-2) 評分，並加權排名得出結果。其中氣象因子包含表面溫度 (temperature surface, TSF)、蒸氣壓差 (vapor pressure deficit, VPD)、短波輻射 (short wave incoming radiation, SWI)、相對濕度 (relative humidity, RH) 及長波輻射 (longwave outgoing radiation, LWO)，TSF 是影響作物生長與產量的關鍵；而 VPD 及 RH 則與作物蒸散率相關，影響水及養分的傳輸；SWI 則直接反映了日照的強弱；LWO 則反應從溫室內部釋出的長波輻射能量。

此外，篩選結果顯示，預測主要受到相同物理意義的 CWA 資料影響，例如 TSF 是預測溫度的關鍵因子，而 SWI 對相對濕度的預測表現尤其重要；從操作層面來看，北部下捲簾對調節微氣候有較高的影響力，推測其遮蔽效果和氣流控制能力較強。篩選結果也顯示，捲簾比內遮蔭及天窗更重要，以上篩選結果皆符合物理意義和常理推斷。

表 2. 因子篩選結果。

溫度	相對濕度	光照強度
TSF 溫度	SWI 短波輻射	RH 相對濕度
VPD 蒸氣壓差	RH 相對濕度	VPD 蒸氣壓差
北下捲簾	北下捲簾	LWO 長波輻射
南下捲簾	南下捲簾	SWI 短波輻射
北上捲簾	南上捲簾	北下捲簾
南上捲簾	天窗	南上捲簾
內遮蔭	內遮蔭	內遮蔭

由表 3 所示，各模式在溫室微氣候皆有不錯之預測能力，其中又以光照強度 (photosynthetically active radiation, PAR) 較為優異，其原因為光照強度受到日照影響，使得資料特性較為規律，模式較能捕捉其特徵及關連性。以 R^2 為評鑑標準，ANFIS 表現皆於 0.8 以上，能夠說明其模糊規則庫功能優勢，其結構相對另外兩種模式來的簡單，能夠有較好之穩定性。以 MAE 為評鑑指標，CNN 除溫度資料外，其他兩項目標因子皆有較好之表現，說明卷積層擷取重要特徵之優點。

表 3. 各模式 T+1 預測結果。

氣象因子	模式	R2	MAE
溫度(°C)	CNN	0.75	2.50
	LSTM	0.83	2.37
	ANFIS	0.85	1.64
相對濕度(%)	CNN	0.75	6.87
	LSTM	0.70	7.49
	ANFIS	0.80	6.94
光照強度(W/m ²)	CNN	0.97	33.13
	LSTM	0.97	35.54
	ANFIS	0.96	49.06

四、結論

本研究應用深度學習技術於空氣污染、雨水下水道水位及微氣候預測，成功證明了AI模型在這些環境議題中的應用潛力，為數位化城市發展提供關鍵技術支持，加速智慧城市建設進程。透過注意力機制、自編碼器與卷積模型。本研究顯示，無論是空氣污染預測、下水道水位預測，還是微氣候預測，深度學習技術都能有效捕捉非線性關聯。特別是在多變的氣象和環境條件下，這些技術展現出在不同環境議題中的適應性和通用性。相較於傳統的物理模型，深度學習能更好地處理非線性數據關係，並具備更高的預測精度與實用性。

對於 $PM_{2.5}$ 的預測，本研究主要貢獻在於提出應用注意力機制模型。結果顯示，該模型在不同區域和季節的預測準確度均優於傳統基準模型。在雨水下水道水位預測中，應用了自編碼器成功降低數據維度，並利用 C-AE 模型進行高精度的水位預測，有助於減災防洪管理。針對溫室微氣候預測方面，XGBoost 篩選出的特徵符合物理意義，並能有效應用於溫室微氣候的預測。ANFIS 模型在穩定性上具有優勢，CNN 則擅長捕捉重要特徵，這些結果為未來溫室環控提供了參考。

未來研究可考慮在模型中引入更多氣象和環境變數，以提升預測準確度，並擴展至不同城市或區域進行驗證，評估模型的普適性與穩定性。針對極端天氣的即時預測技術和預警系統也需進一步優化，以應對更加複雜的氣候挑戰。同時，結合其他機器學習模型進一步提升預測的精度與穩定性。開發能適應不同環境變化的自適應模型，並將預測結果與自動控制系統結合，實現即時的環境調節。同時，研究氣候變遷對環境資料的長期影響，調整模型以應對未來更極端的氣候條件，是未來的重要發展方向。

參考文獻

1. Arnold, Jeffrey G, et al., *Journal of the American Water Resources Association*, **34** (1), 73 (1998).
2. Beven, Keith J. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons, (2012).
3. Chang, Li-Chiu, Jia-Yi Liou, and Fi-John Chang, *Journal of Hydrology*, **612**, 128086 (2022).
4. Chang, Fi-John, Li-Chiu Chang, and Jui-Fa Chen, *Water*, **15** (10), 1846 (2023).
5. Fletcher, Tim D, Herve Andrieu, and Perrine Hamel, *Advances in water resources*, **51**, 261 (2013).
6. Gharghory, S. M., *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, **19** (2), 18 (2020).
7. Goliff, Wendy S, William R Stockwell, and Charlene V Lawson., *Atmospheric Environment*, **68**, 174 (2013).
8. Grell, Georg A, et al., *Atmospheric environment*, **39** (37), 6957 (2005).
9. Hu, Juntao, et al., *Air Quality, Atmosphere & Health*, **16** (4), 857 (2023).
10. Jang, J-SR., *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, **23** (3), 665 (1993).
11. Kao, I-Feng, et al., *Journal of Hydrology*, **583**, 124631 (2020).
12. Kao, I-Feng, et al., *Journal of Hydrology*, **598**, 126371 (2021).
13. Katsoulas, Nikolaos, and Constantinos Kittas, *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, **2** (1), 31 (2008).
14. Kow, Pu-Yun, et al., *Expert Systems with Applications*, **210**, 118481 (2022).
15. Kow, Pu-Yun, et al., *Environmental Pollution*, **306**, 119348 (2022).
16. Kow, Pu-Yun, et al., *Bioresource Technology*, **369**, 128412 (2023).
17. Kow, Pu-Yun, et al., *Science of The Total Environment*, **927**, 172246 (2024).
18. Kow, Pu-Yun, et al., *Journal of Environmental Management*, **351**, 119789 (2024).
19. Kratzert, Frederik, et al., *Hydrology and Earth System Sciences*, **22** (11), 6005 (2018).
20. Li, Hongfei, et al., *Methods*, **204**, 215 (2022).
21. Li, X. X., et al., *Computers and Electronics in Agriculture*, **217**, 13 (2024).
22. Lin, Y. S., et al., *Horticulturae*, **10** (3), 19 (2024).
23. Ma, D. D., et al., *Computers and Electronics in Agriculture*, **162**, 134 (2019).
24. Mosavi, Amir, Pinar Ozturk, and Kwok-wing Chau. *Water*, **10** (11), 1536 (2018).

25. NCDR. "National Report on Disaster Risk Reduction." Ed. National Science and Technology Center for Disaster Reduction, Taiwan (2022).
26. Osman, Ahmedbahaaldin Ibrahim Ahmed, et al., *Ain Shams Engineering Journal*, **12** (2), 1545 (2021).
27. Rajak, Prem, et al., *Journal of Agriculture and Food Research*, **14**, 100776 (2023).
28. Shafi, U., et al., *Sensors*, **19** (17), (2019).
29. Shi, Dongyuan, et al., *Agronomy*, **14** (2), 254 (2024).
30. Sun, Wei, and Fi-John Chang, *Water*, **15** (20), 3548 (2023).
31. Sun, Wei, Li-Chiu Chang, and Fi-John Chang, *Journal of Hydrology*, **636**, 131250 (2024).
32. Taye, Mohammad Mustafa, *Computers*, **12** (5), 91 (2023).
33. Wakchaure, Manas, B. K. Patle, and A. K. Mahindrakar, *Artificial Intelligence in the Life Sciences*, **3**, 100057 (2023).
34. Zhang, Xuesong, Raghavan Srinivasan, and Michael Van Liew, *Transactions of the ASABE*, **51** (6), 2039 (2008).
35. Zong, Ruihan, et al., *Atmospheric Environment*, **186**, 144 (2018).
36. Zhou, Yanlai, et al., *Journal of cleaner production*, **209**, 134 (2019).
37. 張斐章, 張麗秋, 類神經網路導論：原理及應用, 滄海圖書資訊股份有限公司, (2015).

作者簡介

邱普運先生為國立臺灣大學生物環境系統工程所博士，現為國立臺灣大學生物環境系統工程所博士後研究員。

Pu-Yun Kow received his Ph.D. in Bioenvironmental Systems Engineering from National Taiwan University. He is currently a Postdoctoral Researcher in the Department of Bioenvironmental Systems Engineering at National Taiwan University.

王韻婷小姐現為國立臺灣大學生物環境系統工程所博士生。

Yun-Ting Wang is currently a Ph.D. student in the Department of Bioenvironmental Systems Engineering at National Taiwan University

林雋傑先生現為國立臺灣大學生物環境系統工程所碩士生

Jun-Jie Lin is currently a M.S. student in the Department of Bioenvironmental Systems Engineering at National Taiwan University

劉佳儀小姐為國立臺灣大學生物環境系統工程所碩士，現為國立臺灣大學生物環境系統工程所研究助理。

Jia-Yi Liou received her M.S. in Bioenvironmental Systems Engineering from National Taiwan University. She is currently a Research Assistant in the Department of Bioenvironmental Systems Engineering at National Taiwan University.

張佑文先生為國立臺灣大學生物環境系統工程所碩士，現為國立臺灣大學生物環境系統工程所研究助理。

Yu-Wen Chang received his M.S. in Bioenvironmental Systems Engineering from National Taiwan University. He is currently a Research Assistant in the Department of Bioenvironmental Systems Engineering at National Taiwan University.

張斐章先生為美國普渡大學土木所博士，現為國立臺灣大學生物環境系統工程所特聘教授。

Fi-John Chang received his Ph.D. in Civil Engineering from Purdue University. He is currently a Distinguished Professor in the Department of Bioenvironmental Systems Engineering at National Taiwan University.

大氣邊界層觀測、模擬技術與資料同化

Atmospheric Boundary Layer Observation, Modeling and Data Assimilation

鄭芳怡、王聖翔、楊舒芝

Fang-Yi Cheng, Sheng-Hsiang Wang, Shu-Chih Yang

大氣邊界層位於地表與自由大氣層之間，是受地表作用力影響而形成的區域，平均厚度約為一公里。邊界層內的氣象條件對於短期天氣系統的變化、長期氣候變遷以及空氣污染物的傳輸與擴散過程，具有重要影響。現代觀測技術，如探空氣球、無人機和微脈衝光達等，能夠提供邊界層垂直結構及氣象條件的詳細資料。除了觀測外，數值模擬也是解析邊界層演變過程的重要方法。目前，邊界層氣象模擬主要透過邊界層參數化方案或大渦流模擬進行。此外，資料同化技術結合邊界層觀測數據與氣象模擬，能有效提升氣象預報的準確性。本文系統性地介紹觀測技術、數值模擬和資料同化在大氣邊界層應用中的進展，以加深對邊界層的理解並提升其預報能力。

The atmospheric boundary layer, located between the Earth's surface and the free atmosphere, is a region influenced by surface forces, with an average thickness of approximately one kilometer. Meteorological conditions within the boundary layer play a critical role in the evolution of short-term weather systems, long-term climate changes, and the transport and dispersion of air pollutants. Modern observation technologies, such as radiosondes, drones, and micro-pulse lidars, provide detailed data on the vertical structure and meteorological conditions of the boundary layer. In addition to observations, numerical simulations are essential for analyzing the evolution of the boundary layer. Current boundary layer meteorological simulations primarily utilize boundary layer parameterization schemes or large-eddy simulations. Furthermore, data assimilation techniques that integrate boundary layer observational data with meteorological simulations can significantly enhance the accuracy of weather forecasts. This study systematically introduces advancements in observation technologies, numerical simulations, and data assimilation in the study of the atmospheric boundary layer, aiming to deepen our understanding of this region and improve its forecasting capabilities.

一、大氣邊界層

大氣邊界層是大氣中最接近地表的區域層，受到地表作用的影響，例如地表受熱與冷卻、摩擦力、陸氣交互作用等而形成。邊界層的厚度可從數百公尺到幾千公尺不等，也是人

類日常活動的主要範圍。都會地區的熱島效應、海陸風環流結構、農業氣象以及風能與光電能源的開發與評估，都與大氣邊界層的氣象特性密切相關。邊界層的氣象特徵直接影響天氣系統的發展以及大氣污染物的傳輸與擴散過程，因此準確掌握邊界層中的氣象變化，對於天氣預報和大氣環境監測具有重要意義。

大氣與地表間的動量、熱量、水氣交換過程，影響著邊界層內的熱力與動力特性。白天時，由於熱力作用主導，大氣呈現對流邊界層的特性，此時大氣污染物可隨著混合層 (mixing layer) 的發展，而被攜帶至混和層頂部。然而到了夜間，邊界層轉為穩定邊界層 (stable boundary layer)，污染物較難擴散，累積於近地表，常造成嚴重的空氣污染 (見圖1)。

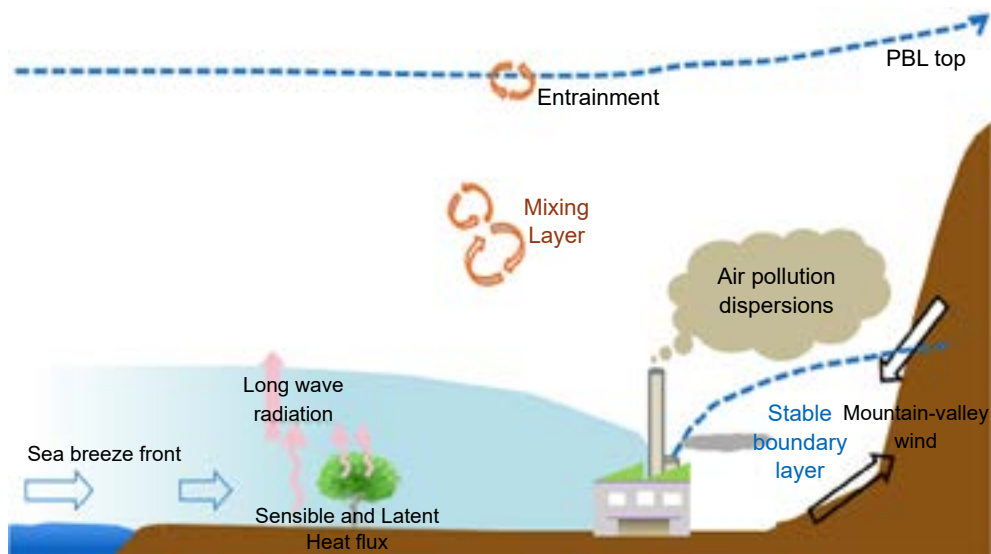


圖 1. 大氣邊界層地表—大氣交互作用與大氣混合過程示意圖。

過去，大氣垂直剖面的觀測主要依賴氣象署探空觀測資料，但由於測站分布稀疏，北臺灣僅有新店探空站，且時間解析度為一天早晚兩筆資料，無法解析邊界層日夜變化特徵。此外，每次探空所需經費不含人力即高達一萬塊臺幣，因此除了特殊觀測實驗計畫，政府及學界難以負擔如此龐大開銷。近年來，受惠於大氣邊界層觀測技術的提升，如無人機的發展以及迷你探空系統的開發，大大增進了對邊界層發展過程的理解。Ke et al. (2018) 利用無人機觀測夏季邊界層高度，飛行高度高達 3 公里，研究證明無人機應用於邊界層觀測的可靠度。作者群等人在 2020—2023 年春季期間，進行臺灣大氣邊界層觀測、模擬與資料同化實驗 (Taiwan Atmospheric Planetary boundary Layer Observation, Model and Data Assimilation, T-POMDA)，在中部、雲嘉南地區進行觀測與模擬實驗，以探討邊界層演變過程對空氣污染物的傳輸與擴散過程的影響。

除了透過觀測實驗計畫所收集的資料來解析大氣邊界層特徵，氣象數值模擬也是研究邊界層的重要方法。由於邊界層內部的湍流、熱量和氣水通量傳輸過程複雜，傳統數值模式主要透過邊界層參數化方案進行模擬，而這些假設也是氣象模擬不確定性的主要來源之一。邊界層的動力與熱力過程包含湍流、熱傳輸、輻射、摩擦力以及大氣穩定度變化等物理過程的交互作用，使得邊界層的演變過程難以單靠傳統模式準確模擬。隨著邊界層觀測技術的進步以及數值模式技術的進步，資料同化技術結合觀測資料與數值模式，提升了邊界層氣象與複雜環流結構的模擬成效 (Yang et al. 2022)。

本文從觀測技術、數值模擬及資料同化在大氣邊界層中的應用及進展，探討這些技術如何增進我們對大氣邊界層的理解及預報能力。

二、邊界層的觀測技術

1. 探空氣球與無人機

近年來，大氣垂直剖面觀測在大氣科學研究中扮演著關鍵角色。然而，傳統探空設備操作不便且成本高昂。為了解決此問題，在國科會及環境部的支持下，中央大學大氣系王聖翔教授團隊成功開發出一套具備高機動性與準確性的微型探空觀測系統 (圖 2)。該系統包含自行研發的 Aerosond 探空感測器，可同時量測壓力、溫度、相對溼度、經緯度以及 $\text{PM}_{2.5}$ 等重要參數。數據透過特製接收天線即時回傳，並由專用軟體進行資料處理與展示。技術團隊採用 C++ 編寫底層軟體，並以 JAVA 和 VB 開發操作介面，整合出一套完整的觀測解決方案。

此微型探空系統展現了卓越性能，僅進行氣象觀測時系統總重量為 9.8 公克，加裝 $\text{PM}_{2.5}$ 觀測模組後重量為 48.9 公克，具備極佳的攜帶性與操作便利性。通訊性能上，系統可垂直傳輸 10 公里、水平傳輸 100 公里，極大擴展了觀測範圍，為大氣科學研究提供了更完整的立體觀測數據，助於深入了解大氣邊界層的發展過程及空氣污染的形成機制。

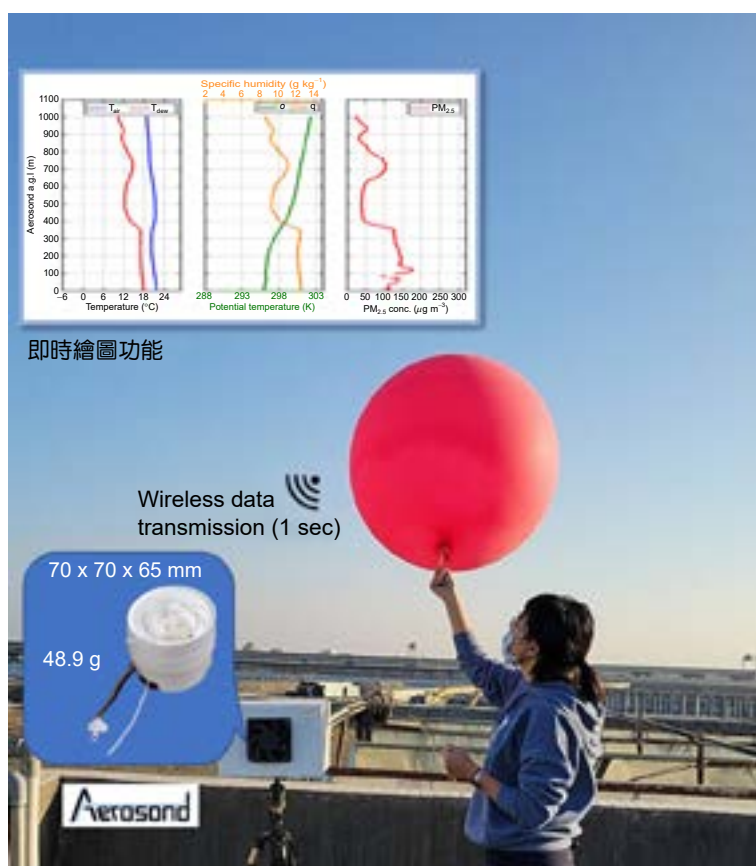


圖 2. T-POMDA 觀測實驗計畫期間，研究人員於臺南縣善化空品站進行探空氣球施放作業。

此外，無人機的應用為大氣邊界層觀測展開了新頁。自 2016 年開始，王聖翔教授團隊便投入了無人機的開發及大氣觀測應用，直至 2020 年更與氣象署成功開發出一套先進的無人機大氣觀測系統 (圖 3)，無人機型號代碼為 360V4，直徑 360 mm 的四軸多旋翼無人機，該系統以碳纖維打造的四軸多旋翼無人機為平台，搭載自行研發的 Aeromount 感測器，可同時量測壓力、溫度、相對溼度、風向風速、PM_{2.5} 等大氣參數，並具備即時資料回傳功能。這套系統採用全非中國製元件，具備優異性能指標：最大起飛總重 2 公斤、額外掛載重量可達 600 克，最高可飛行至 3000 公尺高度，且具備 IP65 防塵防潑水等級。無人機配備先進的飛行控制器，整合 IMU 慣性量測單元與 GPS 全球定位系統，可實現高精度的定位能力，垂直精度達 ± 0.5 公尺，水平精度為 ± 2.5 公尺。

系統設計特別注重實用性與可靠性，採用三層結構配置：頂層安裝 Aeromount 感測器、GPS 系統與通訊天線；中層設置飛行控制器；底層配置動力系統與電池。值得注意的是，系統重心特意配置於感測器位置，以確保風向風速反演數據的準確性。地面控制系統採用軍規等級筆記型電腦，搭配專業的無人載具系統軟體，具備自動航線規劃、即時數據回傳等功能。通訊系統採用 2.4G 藍芽技術進行起飛前檢查與航線規劃，實際飛行則完全依靠衛星導航，突破傳統遙控通訊的距離限制。本系統已累積超過千次垂直剖面觀測經驗，在 6—7 級強風條件下仍能穩定運作，單次觀測可持續 30 分鐘以上，為大氣科學研究提供了可靠的觀測平台。



圖 3. 大氣無人機探空觀測系統設備圖。從左至右分別為通訊天線、四軸多旋翼無人機和地面站電腦(軍規筆電)。

2. 微脈衝光達

為掌握大氣邊界層的連續變化，光達技術發揮了重要作用。自 2006 年起，我國環境部與美國 NASA 展開重要合作，在臺灣主要都會區和高污染熱區建置微脈衝光達 (micro-pulse lidar, MPL) 觀測網，目前分別架設於中央大學、臺中西屯、雲林斗六、高雄左營等四地，提供懸浮微粒垂直剖面的即時監測。值得一提的是，這套光達系統為 NASA 的技術移轉，採用波長 532 奈米的綠光雷射，具備人眼安全的特性。簡述雷射光學路徑傳送方式，

一開始由固體晶體 (ND:YLF, 摻釹氟化鈮鋰晶體) 激發 1064 奈米、經過倍頻產生 532 奈米雷射光。以發射頻率 2500 Hz 的雷射光源，通過直徑 20 公分光學鏡片之卡塞格林式望遠鏡 (Cassegrain-type) 進行同軸發射接收，雪崩式光電二極體 (avalanche photodiode) 半導體光電倍增管接收回來光子數目 (photon count)，最後通過觸發器 (trigger) 記錄每秒所得之光子數後收集至電腦。MPL 觀測原理為，當發射出的雷射光碰到懸浮微粒時，會在微粒周圍產生散射作用，而返回正對光達方向的散射我們稱為背向散射，此散射光可被微脈衝雷射雷達系統接收，並紀錄為光子數訊號，又此光達有偏振功能，可將背向散射訊號分為相對於發射波的垂直偏振方向 (垂直偏振，cross-polarization)，及平行偏振方向 (平行偏振，co-polarization)，意即微脈衝光達可提供標準化相對背向散射 (normalized relative backscatter, NRB) 以及消偏振比 (depolarization ratio, δ) 數值，不僅能表現氣膠相對濃度的觀測，更因具有氣膠消偏振率的觀測，提供氣膠形態判斷依據，容易區分沙塵氣膠及燃燒產生的細顆粒氣膠。光達的資料解析度為每分鐘一筆，垂直解析度達 75 公尺，最高觀測高度為 30 公里。結合資料演算與分析，可準確估算大氣邊界層高度，長期觀測資料更揭示了臺灣各地區邊界層特性的差異，如冬春季中部內陸地區因風速微弱，邊界層高度變化對地面空氣品質影響顯著；而沿海地區如左營則呈現較為穩定的海洋型邊界層特徵。圖 5 展示了微脈衝光達與無人機觀測的整合觀測成果，清晰呈現一整天邊界層的發展過程及高層氣膠伴隨海陸風傳送的特徵。



圖 4. 位於中央大學的微脈衝光達，此光達系統於 2006 年便持續觀測，提供北臺灣的空氣品質垂直分布即時資料。

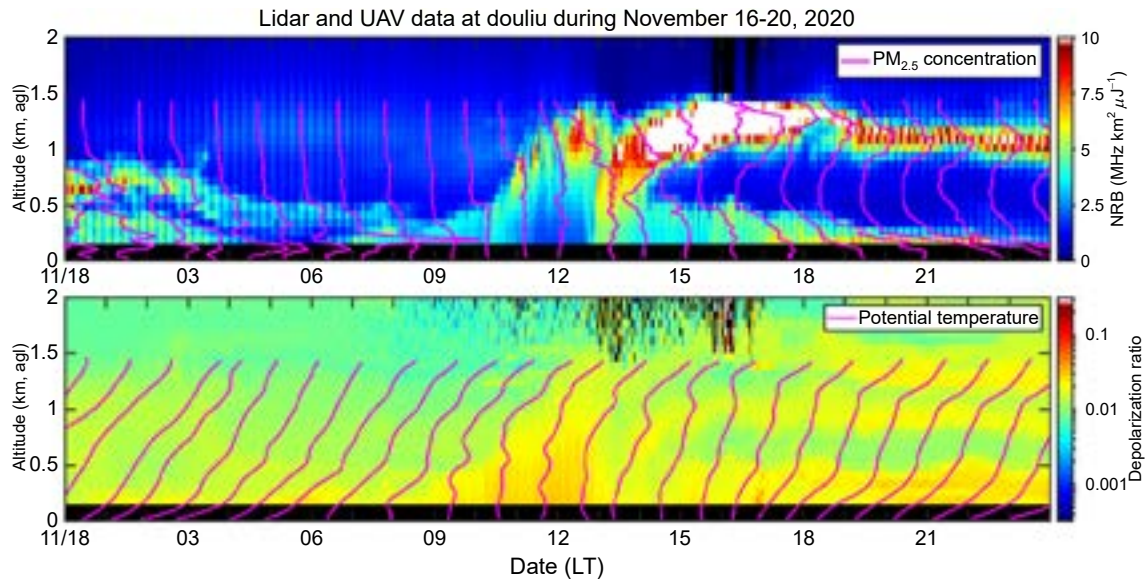


圖 5. 2020 年 11 月 18 日斗六光達之 NRB 訊號、消偏振比疊加無人機觀測之 $PM_{2.5}$ 濃度與位溫垂直剖面。背景高解析度色階為光達觀測結果，圖中桃紅色線為無人機觀測結果。

三、大氣邊界層的模擬技術

大氣邊界層中的湍流運動橫跨多個時間與空間尺度，傳統數值氣象模式透過求解大氣動力和物理方程式，以模擬邊界層的動力和熱力過程。近地面層（約佔邊界層厚度的 10%）受到地表大氣能量交互作用的影響，其特徵與上方邊界層有所差異。數值氣象模擬通常應用莫寧-奧步霍夫地面層相似理論 (Monin-Obukhov surface layer similarity theory)，模擬地表與近地層大氣之間的通量交換過程。地面層以上至邊界層頂的範圍，主要透過邊界層參數化假設，模擬紊流的傳輸與運動過程，這一限制也導致模擬的不確定性。

Weather Research Forecasting (WRF) 氣象模式 (Skamarock et al., 2008)，為全球氣象學家廣泛使用的數值模式，該模式提供多種邊界層參數化方案，使用者可根據需求，選取適合的方案來進行模擬。邊界層參數化方法，可區分為局地 (local) 與非局地 (nonlocal) 方法。局地方法依據鄰近點的變數進行模擬，而非局地方法則使用跨層的變數進行模擬。Yonsei University (YSU) 參數化方法為 Hong 等人於 2006 年所發表的邊界層參數化方案 (Hong et al., 2006)，其以 K-theory (Troen and Mahrt, 1986; Holtslag and Boville, 1993) 梯度傳遞的概念為基本架構，假設紊流通量與變數梯度成正比關係，使用已知的變數梯度 $\partial(\)/\partial z$ 來參數化未知的紊流通量項，再透過渦流擴散係數 (K) 連結兩者之間的關係。然而，K-theory 所提出的垂直梯度傳遞概念為局地的傳遞方式，即混合傳遞作用只發生在相鄰兩層之間，而這樣的觀念不適用於模擬白天對流邊界層的發展，因其無法正確描述因地表加熱所產生的跨層傳遞 (Nonlocal Transport)。為改善此問題，在 YSU 參數化方法中，加入一逆梯度作用項，以考量非局地跨層傳遞過程。

K-theory 屬於一階亂流閉合 (first-order turbulence closure) 方法，其他像是 1.5 階或更高階的亂流閉合方法，也是常見的邊界層參數化方案，其主要在大氣運動控制方程式裡加入湍流強度 (turbulence kinetic energy, TKE) 或紊流通量的預報方程式。Mellor-Yamada Nakanishi-Niino Level 2.5 (MYNN 2.5) 邊界層參數化方案 (Nakanishi 和 Niino, 2006)，基於湍流動能 (TKE) 方程，採用了二階閉合的湍流模式，計算湍流動能的產生、消耗和傳輸過

程，這也使得 MYNN2.5 方法能更加準確描述邊界層內湍流強度的變化。MYNN2.5 方案也針對白天對流邊界層發展過程強度不足的問題，使用大渦流模擬 (large-eddy simulation, LES) 資料，以提升大氣邊界層發展的模擬成效。此參數方案也調整了判定邊界層高度的臨界湍流動能數值，以提升模擬的邊界層高度的準確性，進而改進大氣垂直方向上的傳輸擴散過程。

為瞭解邊界層參數化對氣象模擬以及空品模擬的影響，針對 2023 年 2 月 28 日一高污染事件，挑選 YSU 以及 MYNN2.5 邊界層參數化，分別進行 WRF 氣象模式以及 CMAQ 空品模式模擬。圖 6 呈現在近地層模擬之流場以及 $PM_{2.5}$ 濃度分佈 (上圖) 以及邊界層高度分佈 (下圖)。兩組模擬結果在地面的 $PM_{2.5}$ 濃度有明顯差異，其差異一部分來自於邊界層高度的模擬差異，如 YSU 邊界層參數化模擬之邊界層高度低於使用 MYNN2.5 之模擬結果，因此也導致較高的 $PM_{2.5}$ 模擬結果。另一方面，可看到使用 MYNN2.5 邊界層參數化，在中部外海模擬出一背風渦旋結構，其可將污染物稍微帶離陸地。但使用 YSU 邊界層參數化，在中部外海處無渦旋結構。此分析也說明邊界層參數化，除了影響大氣邊界層的發展演變過程之外，對於背風渦旋這樣的複雜天氣系統，也有著顯著影響。

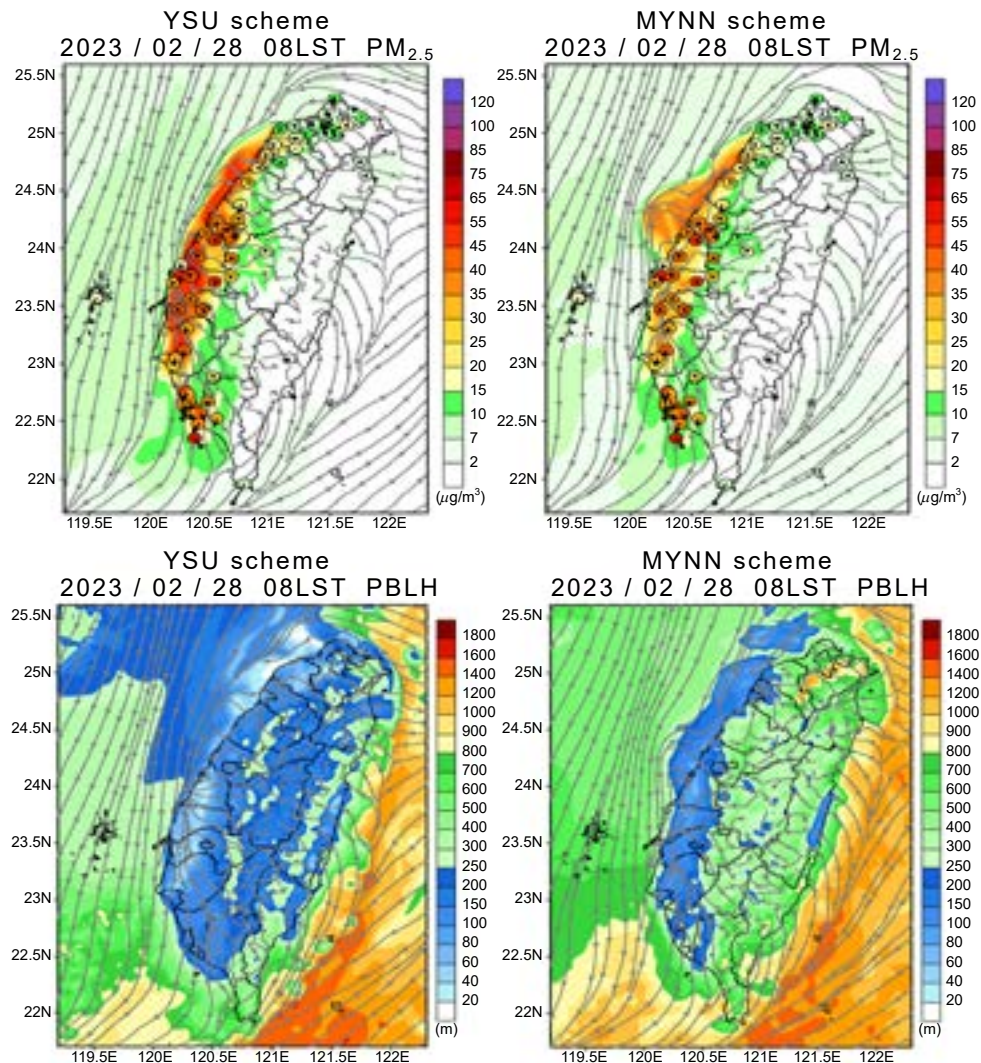


圖 6. 近地層模擬之流場以及 $PM_{2.5}$ 濃度分佈 (上圖) 以及邊界層高度分佈 (下圖)。上圖圓圈打點為觀測之 $PM_{2.5}$ 濃度。左圖使用 YSU 邊界層參數方法，右圖使用 MYNN2.5 邊界層參數方法。

隨著計算資源的提升，高解析度模擬廣泛應用於氣象與空氣品質模擬。然而，當網格水平解析度提升至小於 1 公里時，許多傳統的邊界層參數化方法難以正確描述湍流運動過程 (Honnert et al. 2020)。在高解析氣象模擬中，由於模式網格間距接近對流邊界層內的紊流尺度，大於網格解析度的紊流運動可以由數值模式直接解析，而小於網格尺度的紊流運動則需透過邊界層參數化方案進行描述。這種情況導致造成部分紊流運動被數值模式解析，而部分仍需參數化處理，形成所謂的湍流灰區 (gray zone)，其模式網格解析度範圍約為 100 公尺至 1 公里之間 (Hong and Dudhia, 2012; Wyngaard, 2004)。如何在此解析度範圍內進行準確的氣象模擬，是當前氣象預報的一大挑戰。為解決此問題，部分邊界層參數化方案已針對模式網格大小，調整紊流參數化過程。Shin-Hong (SH) scale aware scheme 是由 Shin 與 Hong 在 2015 年開發的邊界層參數化方案 (Shin and Hong, 2015)，以 YSU 邊界層方案為基礎，採用 K-theory 梯度傳遞方法。同時，該方案利用 WRF-LES 模式的大渦流模擬資料 (Shin and Hong, 2013)，建立 grid-size dependency function，量化不同網格解析度 (25 公尺至 2 公里) 下次網格紊流通量相對於整體紊流通量的比例，從而提高紊流運動的模擬過程。

此外，傳統上大渦流模擬因計算資源需求高，僅能應用於理想化個案或小範圍模擬。然而，隨著電腦計算資源的提升，大渦流模擬逐漸應用於都市甚至區域尺度的真實大氣模擬。高解析度的大渦流模擬能夠捕捉更細緻的渦流結構與邊界層內動力特徵，例如邊界層湍流機制與雲層發展的交互作用，以及複雜地形與非均勻地表對大氣的影響，進一步增強對大氣邊界層發展過程的理解與描述。

四、邊界層資料同化技術

數值氣象模式可提供風速、溫度及濕度等大氣變數的三維分佈及時間演變，從而模擬大氣邊界層的動熱力結構。然而，模式在預報中依賴初始場和模式動熱力過程，難免存在不確定性。氣象觀測如地面站、探空儀等能提供部分邊界層的真實狀態，而資料同化技術透過數學方法最佳結合觀測及模式資訊，以獲得更接近真實大氣的最佳分析場 (Kalnay 2002)。模式預報提供的最佳估計稱為背景場或初始猜測場，透過同化觀測所獲得的修正量來更新背景場。在此過程中，利用模式預報與觀測的誤差特性來決定修正量。例如，依據誤差大小調整不同資料的權重，以及透過誤差相關性決定修正量的結構。

資料同化方法中利用「背景誤差相關性」將觀測資訊傳遞至其他位置。傳統同化方法中，背景誤差相關性為長期資料統計而得，無法反應短期大氣狀態變化。而當代電腦計算能力大幅提升，利用系集預報的進階資料同化系統，可進一步使用與當下流場相關的背景誤差相關性，使分析修正場反應背景場動熱力特性，讓觀測效益更得以發揮。系集預報的概念為利用多個模式預報場，並以與平均場的差異代表預報的不確定性，並能以此表現出誤差在時空上的流場相依特性。因臺灣具有複雜地形、海陸交界等地理特性，背景誤差相關性的流場相依性質為觀測發揮影響之關鍵。例如，圖 7 為利用高解析度系集預報並選取桃園岸邊單點位置建立模式十米風誤差相關性。相關性高的區域代表所選位置背景風場誤差與此區域背景風場誤差變化特性一致。因此若所選位置有風場觀測，可透過誤差相關性修正該區域風場。圖 7 分析結果，可看到背景誤差相關性有明顯的海陸交界，若在此位置風場觀測提供西風修正量，此西風修正量可延伸至桃園其他區域甚至到新竹岸邊，因此可增強岸邊海風。除了同變數修正外，利用背景誤差相關性也可進行跨變數修正，例如板橋站的探空資料風場觀測，可修正模式場的溫度及濕度等變數。

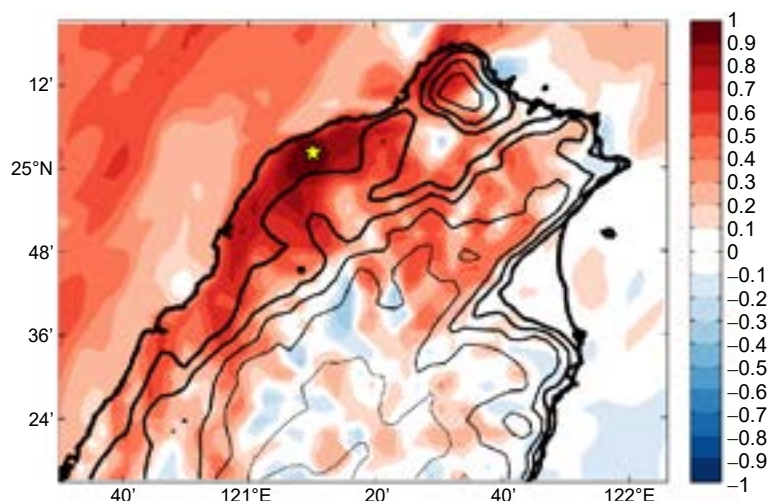


圖 7. 利用系集建立單點十米風 (U10) 之背景誤差相關性。

常見的資料同化方法包含三維／四維變分分析法、系集卡爾曼濾波器及結合兩種的混成法，並以預報分析循環進行。例如，利用 0000 UTC 的六小時模式預報，結合觀測進行同化獲得分析場。再以此分析場為模式初始場進行下一個六小時預報到 0600 UTC。此重複進行的預報分析循環可於空間及時間上傳遞並累積觀測影響。以空品預報為例，邊界層資料同化 (圖 8) 結合氣象模式預報及大氣邊界層觀測，更新模式氣象初始場與預報，再結合大氣化學模式改善空品預報。

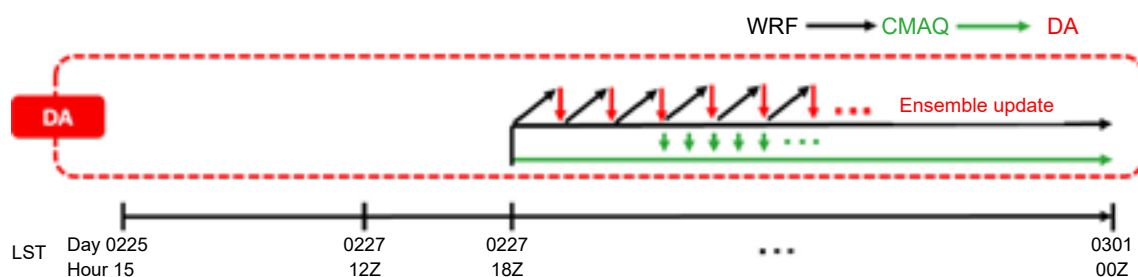


圖 8. 大氣化學模式架構下之資料同化分析預報循環：黑色箭頭代表氣象模式短期預報、紅色箭頭代表資料同化及綠色箭頭代表氣象場輸入大氣化學模式。

在以往傳統氣象觀測中，邊界層觀測資料主要以地面觀測為主。但修正量集中近地面，對於邊界層上半部及邊界層頂的修正量小，不利掌握邊界層內動力或熱力結構隨時間變動，進而無法正確描述污染物在地形上或較高高度上的傳輸或累積。此外，模式近地面風速或溫度仍有一定程度的偏差增加同化修正的困難度。隨著新型態邊界層觀測像是剖風儀、無人機、微型探空及光達等的快速發展，我們可獲得高垂直解析度的觀測資料，解析大氣垂直結構於邊界層的變化。例如，圖 9 為 2022 年 3 月 16 日觀測及不同實驗所得彰化二林站風及溫度垂直分布時間變化。原本的模式模擬 (CTRL 實驗分析風場) 局地環流特性較無法表現出低層西風分量受中央山脈阻擋而在較高處轉為弱東風的特性。同化此處微型探空風觀測，可增強此處一公里高度上的西風風速，並修正 1.5 公里高度上為弱東風，有效加強地形上環流特性 (Wind 實驗)。除此之外，1 公里以上的南風分量也大幅增強。進一步加入同化無人機溫度觀測，可提高模式邊界層內日間溫度，改善邊界層內溫度變化 (Wind+T 實驗分析溫度場)。

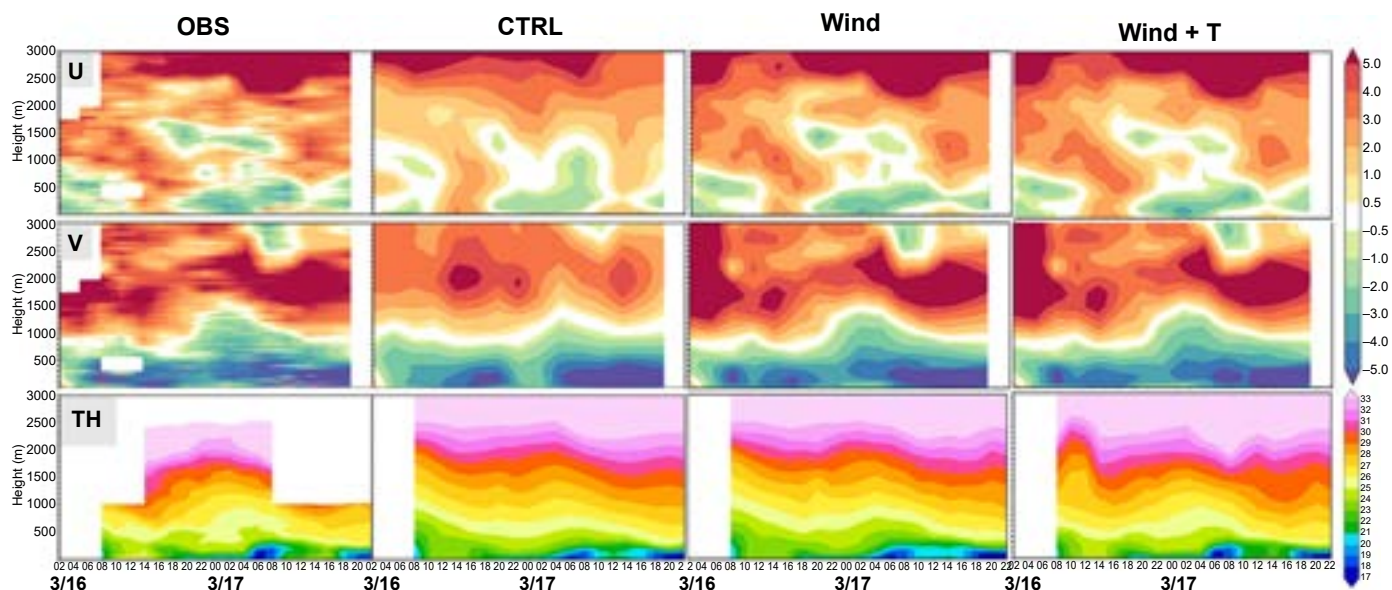


圖 9. 2022 年 3 月 16 日觀測 (第一欄) 及不同實驗所得彰化二林站 U (上排)、V (中排) 風及溫度 (下排) 垂直分布隨時間變化。風場觀測為微型探空資料，溫度則為無人機資料。第二欄為無進行同化實驗 CTRL 模式模擬、第三及第四為實驗 Wind 及 Wind + T 的分析場。

除了直接觀測大氣變數，空氣污染物濃度也可作為邊界層觀測，因污染物的分布與邊界層的動熱力特性高度相關。如南風增強將使污染物北移，而低風速、夜間邊界層頂降低等情況會加強近地面污染累積。若取得污染物濃度剖線觀測，可利用濃度觀測和氣象變數的背景誤差相關性，調整模式邊界層內的垂直結構。在大氣及化學耦合模式預報架構下，透過調整氣象場特性有助於改善空氣品質預報。

圖 10 為利用中央大學及台中西屯兩台微型脈衝光達 (micropulse lidar) 資料反演的 2018 年 12 月 19 日 $PM_{2.5}$ 剖線觀測，透過資料同化進行邊界層氣象場修正的例子 (Yang et al. 2022)。模式第一層風場 (圖 10 下排) 顯示，相較於一般常使用的納近法 (nudging) 法 (圖中 BASE 實驗)，考慮風場不確定性的系集預報平均場可有效調整背風渦旋位置，減弱西半部近岸風速 (圖中 CNTL 實驗)。同化 $PM_{2.5}$ 資料進一步加強中部至桃園一帶西南風，增加了該區域近地面 $PM_{2.5}$ 濃度 (圖中 LDA 實驗)。

五、結論

本文說明了現代觀測技術，包括儀器設備及相關測量方法的發展，並結合模擬技術的最新進展，解析大氣邊界層的結構和演變過程。此外，資料同化技術的應用不僅能整合觀測與模式數據，亦能有效更新氣象數據，提升預報的準確性。這些技術的綜合應用，除了提升氣象預報、空氣品質預報的準確度，還有助於環境監測，並為科學家提供更完善的數據基礎，以支持進一步的研究與政策制定。

然而，臺灣的大氣邊界層研究依然面臨諸多挑戰，包含剖面觀測資料不足、模式邊界層顯著誤差 (如地表風速和邊界層高度的系統性偏差) 等問題。未來，隨著無人機、風光達等新興觀測技術以及機器學習方法的引入，預期將能突破這些限制，進一步提升大氣邊界層的資料同化與預報能力。

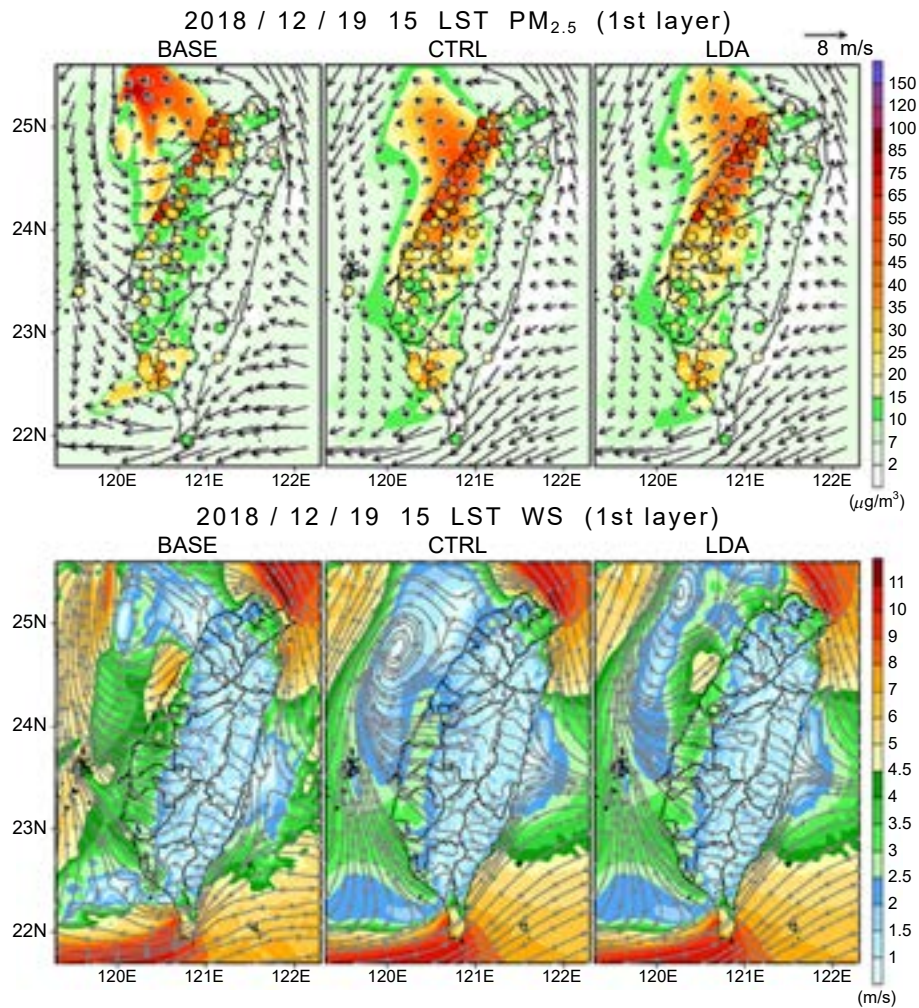


圖 10. 2018 年 12 月 19 日 1500 LST 模式 $PM_{2.5}$ (上排) 及模式第一層風場 (下排)。
第一至第三欄為 BASE、CNTL、及同化光達 $PM_{2.5}$ 剖線之 LDA 實驗。

參考文獻

1. Holtslag, A. A. M. and B. A. Boville, *Journal of Climate*, **6** (10), 1825 (1993).
2. Hong, S.-Y., Y. Noh and J. Dudhia, *Monthly Weather Review*, **134** (9), 2318 (2006).
3. Hong, S.-Y. and J. Dudhia, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93** (1), ES6 (2012).
4. Honnert, R., and Coauthors, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **125**, e2019JD030317 (2020).
5. Kalnay, E., *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*, Cambridge: Cambridge University Press (2002).
6. Ke, L.-J., Wang, S.-H., Huang, H.-Y., Wang, Y.-C., Chuang, H.-F., Hung, R.-Y., You, Z.-C., Chang, S.-C., *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **23**, 103 (2018).
7. Nakanishi, M., Niino, H., *Boundary-Layer Meteorology*, **119**, 397 (2006).
8. Shin, H. H. and S.-Y. Hong, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **70** (10), 3248 (2013).
9. Shin, H. H. and S.-Y. Hong, *Monthly Weather Review*, **143** (1), 250 (2015).
10. Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Liu, Z., Berner, J., Huang, X.Y., A Description of the Advanced Research WRF Model Version 3. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO., (2008)
11. Troen, I. and L. Mahrt, *Boundary-Layer Meteorology*, **37** (1-2), 129 (1986).
12. Wyngaard, J. C., *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**(14), 1816 (2004).
13. Yang, S.-C., F.-Y. Cheng, L.-J. Wang, S.-H. Wang, C.-H Hsu, *Atmospheric Environment*, **77**, (2022).

作者簡介

鄭芳怡小姐為美國休士頓大學地球與大氣科學博士，現為國立中央大學大氣科學學系教授。

Fang-Yi Cheng received her Ph.D. in the Department of Earth and Atmospheric Sciences from University of Houston. She is currently a Professor in the Department of Atmospheric Sciences, College of Earth Sciences at National Central University.

王聖翔先生為國立中央大學大氣物理博士，現為國立中央大學大氣科學學系特聘教授。

Sheng-Hsiang Wang received his Ph.D. in Atmospheric Physics from National Central University. He is currently a Distinguished Professor in the Department of Atmospheric Sciences, College of Earth Sciences at National Central University.

楊舒芝小姐為美國馬里蘭大學大氣和海洋科學博士，現為國立中央大學大氣科學學系特聘教授。

Shu-Chih Yang received her Ph.D. in the Department of Atmospheric and Oceanic Science from University of Maryland. She is currently a Distinguished Professor in the Department of Atmospheric Sciences, College of Earth Sciences at National Central University.

Deep-QPF：應用雷達觀測於臺灣深度學習短時降雨預報

Deep-QPF: Deep Learning for Radar-based Rainfall Nowcasting in Taiwan

陳柏孚

Buo-Fu Chen

利用深度學習分析雷達等觀測資料，能精進即時 (< 3-h) 定量降雨預報技術，將人工智慧 (AI) 導入天氣預報實作，在人力專業化、預報精緻化、與作業即時化的趨勢下，增強氣象預報能力。Deep-QPF 深度學習模式，針對未來 3 小時之降雨進行雷達—降雨推估，並可有效地由不同途徑導入不同特性之異質資料，以改進降雨預報成果，尤以改進 0—3-h 降雨預報效果較佳。本文亦涵蓋 Deep-QPF 預報表現分析以及系統性誤差分析，顯示此 AI 預報技術具備投入實務預報使用之條件，將能強化臺灣對短時強降雨之防災應變能力。

Using deep learning to analyze radar and other observational data can enhance real-time (< 3 h) quantitative precipitation forecasting (QPF). Incorporating artificial intelligence (AI) into operational weather forecasting, aligns with the trends of professional specialization, refined forecasting, and real-time operations, thereby strengthening meteorological forecasting capabilities. The Deep-QPF deep learning model predicts rainfall for the next three hours. It effectively integrates heterogeneous data with various characteristics through different approaches, significantly improving rainfall forecasting, particularly for 0-3-hour precipitation forecasts. This paper also analyzes Deep-QPF's forecasting performance and systematic error, demonstrating that this AI-based forecasting technology suits practical forecasting applications. It can enhance Taiwan's disaster response capabilities against short-duration heavy rainfall events.

一、前言

在劇烈天氣系統當中，對流風暴所伴隨之強降雨、強風、冰雹、以及閃電常常為人們帶來嚴重的災害，直接或間接造成農業以及工業上之重大損失。由於地理位置特殊及地形高聳複雜等因素，臺灣地區易受劇烈降雨天氣的影響，主要致災的降雨系統包括：鋒面、梅雨、西南氣流、颱風、及午後熱對流等。針對這些強降雨事件，近年國內氣象作業單位之定量降雨預報已有長足進步。但須注意的是，這些天氣現象當中所產生的對流尺度強降雨事件，在時空尺度上具有變化迅速的特性，並可能在極短時間內對局部地區造成嚴重的災害。

今年 (2024) 10 初，中度颱風山陀兒由高雄登陸侵襲臺灣，並隨後在陸地上逐步減弱消散。雖然颱風環流主要盤據在臺灣的南部，但 10 月 4 日下午一場突如其來的強降雨事件卻在臺灣最北端造成嚴重的災情 (圖 1)。彼時，一波東北季風南下與山陀兒颱風殘餘水氣發生共伴輻合效應，又配合大屯火山群及雪山山脈北段地形舉升作用，造成基隆北海岸發生超出預期之強降雨，新北市金山區三和測站刷新設站以來單日降雨紀錄，達 613.5 毫米；而鄰近之萬里大坪降下 406 毫米；第三名為淡水區六塊厝 389.5 毫米 (圖 1，左)。在此期間，中央氣象署發布多達 27 次警報，但又大又急的降雨仍導致一對夫妻遭洪水沖走不幸身亡。

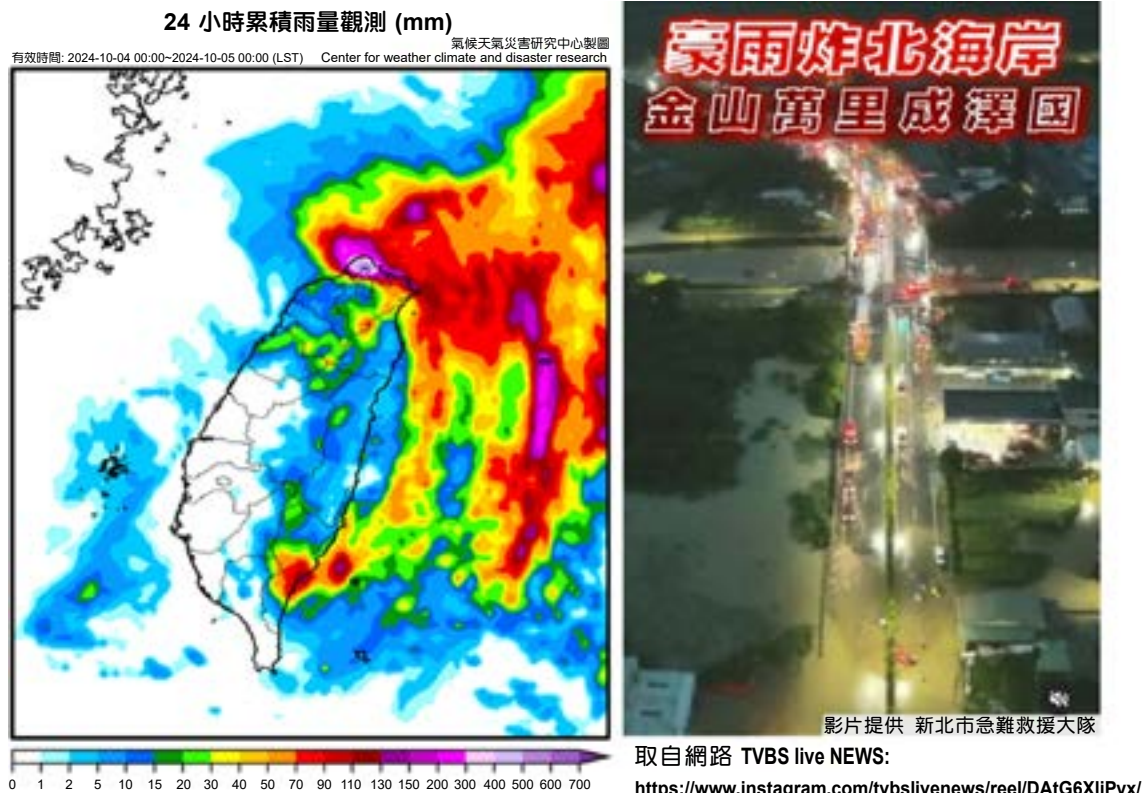


圖 1. 2024 年 10 月 4 日之日累積雨量圖 (左)；山陀兒颱風殘留環流與東北風輻合，金山區三和測站刷新設站以來單日降雨紀錄，達 613.5 毫米，造成嚴重災情 (右)。

地球大氣是一相當複雜之非線性系統，具有渾沌的特性或顯著的「蝴蝶效應」，即一丁點初始狀態的改變或差異都會對此複雜系統之未來演變有顯著影響。因此，若想要預報金山強降雨這類尺度小、變化快的事件，我們必須對大氣的狀態與細節有高度掌握，故大氣資料之水平解析度需要小於 1 公里。然而，目前最先進之作業用「數值天氣預報模式」水平解析度約 3 到 5 公里，故針對此類小尺度劇烈降雨系統，因受到「可預報度」的限制而預報能力較為有限。

為面對這類致災性降雨天氣的預報挑戰，臺大氣候天氣災害研究中心與中央氣象署組成研究團隊，共同發展 AI Deep-QPF 即時降雨預報技術 (陳等, 2023)，逐 10 分鐘更新預報未來 3 小時之降雨趨勢 (圖 2)；比較圖中 Deep-QPF 3-h 累積雨量預報 (圖 2，第二列) 與觀測降雨 (圖 2，第一列)，Deep-QPF 能有效掌握此小尺度強降雨系統在形成階段 (09:00~13:00)、

成熟期 (13:00~20:00)、消散期 (20:00~) 之致災性降雨 (圖 2，紅色色階或更大)。這樣嶄新的 AI 預報技術，充分加值了氣象署近年所擴增之作業雷達觀測資料，供預報員及防災人員使用以利監控及預警致災性降雨。

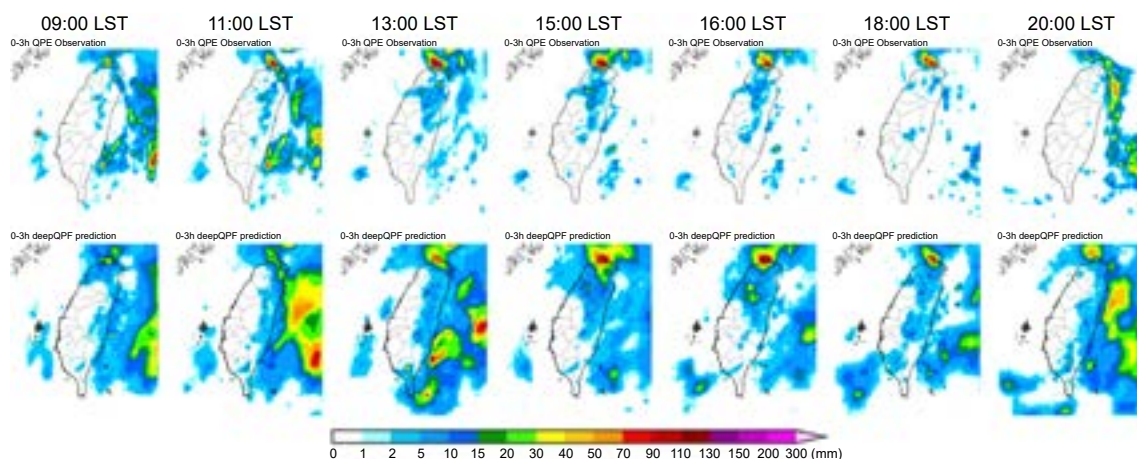


圖 2. 針對 2024 年 10 月 4 日金山暴雨事件之觀測降雨 (第一列) 及 Deep-QPF 三小時累積雨量預報 (第二列)，Deep-QPF 能有效掌握此小尺度強降雨系統在形成階段 (09:00~13:00)、成熟期 (13:00~20:00)、消散期 (20:00~) 之致災性降雨 (紅色色階或更大)。

二、臺灣雷達觀測網資料與 AI

氣象署近年致力於擴增臺灣地區之作業雷達觀測能力 (Chang et al. 2021)，已收集相當數量之三維雷達回波與反演風場資料。目前臺灣氣象雷達網包含 4 部大範圍 S 波段雷達以及 5 部 C 波段防災降雨雷達 (圖 3，左)。四座 S 波段 (波長 ~10 公分) 雷達分別位於五分山、七股、墾丁、花蓮，其 460 公里之觀測範圍涵蓋全臺及鄰近海域，在時間上約 6~7 分鐘會有一筆三維資訊、空間上則可達 250 公尺的解析度；而 5 部 C 波段防災降雨雷達分布在林園、南屯、樹林、雲林 (預計 114 年啟用)、宜蘭 (預計 114 年啟用)，波長較短 (~5 公分) 之降雨雷達提供短時距、高精細 (2 分鐘、250 公尺) 之都會掃描，具有 150 公里觀測範圍。氣象雷達所觀測之雷達回波 (reflectivity，單位為 dBZ) 反映大氣中水相粒子的量體，故能對對流系統的形成與發展有良好的監測能力，如 2018 年 5 月 6 日鋒面個案之雷達回波圖所示 (圖 3，右)。因此，若藉由資料導向的統計方法，系統性分析雷達觀測似能改進短延時強降雨之預報；然傳統統計方法對同時處理高維度、多變數、且時間連續的雷達資料有諸多限制，故資料導向 AI 方法值得嘗試發展。

近年來，圖形運算單元 (graphics processing unit, GPU) 的崛起及廣泛應用，如：深度學習 (deep learning, DL) 和卷積神經網路 (convolutional neural network, CNN) 圖形辨識應用等，快速改變了各應用領域使用高速運算電腦的生態。而利用 GPU 輔助 AI 深度學習來發展天氣預報，亦有許多相關研究。深度學習演算法之特色為能由複雜的多維度資料中自動分析重要特徵 (feature 或 predictor)，並利用所得之特徵進行非線性分類或回歸，甚至是多維度資料的生成。考量到精準的短時降雨預報相當依賴預報員長年累積之實務經驗與主觀判斷；故臺大與氣象署研究團隊，基於預報員實務經驗，嘗試應用新興之人工智慧演算法，分析雷達觀

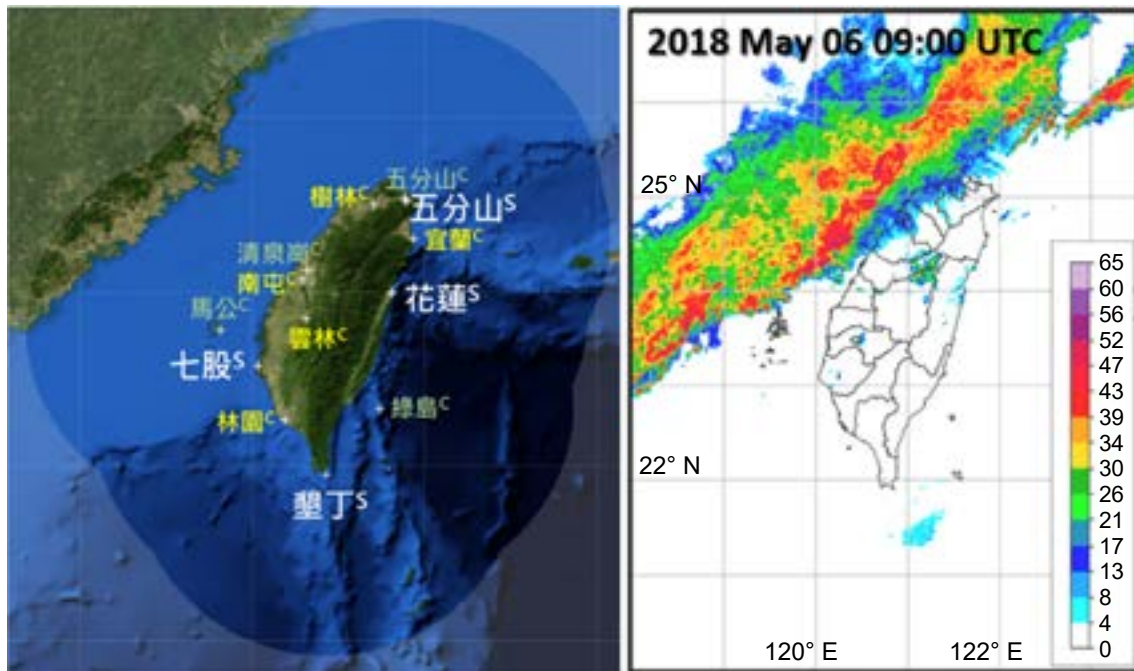


圖 3. 臺灣氣象雷達觀測網 (左)。2018 年 5 月 6 日鋒面個案之雷達回波圖 (右，單位為dBZ)。

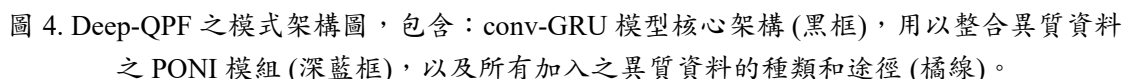
測資料，透過深度學習法模仿預報員習得之預報經驗，自動萃取雷達圖資中的重要特徵，進而發展即時定量降雨預報技術與更多元 (涵蓋時空尺度更大) 之降雨預報與估計指引。目前，研發團隊所發展之 AI Deep-QPF 即時降雨預報技術已投入作業化使用，作業時會逐 10 分鐘更新預報未來 3 小時之降雨趨勢與每小時降雨量。本文之撰文目的即是簡略介紹此一 AI 降雨預報技術。

三、AI Deep-QPF 即時降雨預報技術

Deep-QPF 為一種生成式 AI 模型 (Ashesh et al. 2022)，其生成器模式架構包含：convolutional gated recurrent unit (conv-GRU) 核心模組 (圖 4，黑框)，以及用以整合異質資料之 PONI 模組 (圖 4，深藍框) 兩大部分。核心模組以 CNN 與 RNN 的深層堆疊結構 conv-GRU 作為模型基礎，並結合分辨器模組 (discriminator) 進行訓練、分析過去一小時共 6 筆之逐十分鐘二維雷達回波與降雨率資料，遂生成／預報未來 0-1、1-2、2-3 等三筆小時累積雨量資料。在進行 Deep-QPF 模型之開發時，研究團隊使用了 2015 至 2022 年共 8 年之氣象署 QPESUMS 系統整合回波與雷達降雨率等資料。

比起原本氣象署慣用之 QPESUMS-QPF 雷達外延法，Deep-QPF 核心模組已能在 0-1 小時有優於 QPESUMS-QPF 外延法之亮眼成績。然而，針對第二、三小時的預報，僅使用 Deep-QPF 核心模組卻常有降雨圖像模糊化的問題。因此，研究團隊進一步發展了 PONI 模組，嘗試克服第二小時後 conv-GRU 核心模組輸出模糊化的問題。

實務上，有經驗的預報員除依據即時雷達觀測進行降雨監控外，亦參考諸多降雨相關之環境參數，包含：季節與日夜變化、大氣穩定度、環境背景流場、流場與地形交互作用等，故如何有效運用大氣環境參數輔助 Deep-QPF 模型的降雨判斷，將是技術突破的關鍵。



特別值得注意的是，PONI 模組之輸入除可為上一小時之預報雨量外，亦可導入在所預報時間尺度內較不隨時間變動之各式大氣環境特徵，即所謂之異質大氣資料。最終版本之 Deep-QPF 模型將異質資料經由 PONI 模組傳入 Forcaster，輸入之異質資料包括地形、舉升指數、季節、位溫及風場等 (圖4，橘線)。在導入大氣異質資料後，AI 模式能習得更接近人類預報員的決策模式，譬如：季節與環境位溫有效幫助判斷整體的對流活動強度，而風場與地形資訊能幫助掌握迎風面及背風面的降雨差異。

最後，訓練一次 Deep-QPF 模型約需一塊 V100 GPU 進行約 72 小時的訓練，但模型訓練完成後，即能快速布署於個人電腦上使用，對於防災應用具有極大的便利性。

四、Deep-QPF 預報表現分析

臺灣地區的雷達觀測網近年快速發展，目前中央氣象署已能提供約每 6—7 分鐘一筆之三維資訊、空間上則可達 250 公尺的解析度，能對對流系統的形成與發展有良好的監測能力。而 AI 演算法則為降雨預報技術的發展提供了新的契機，能有效加值雷達網之觀測成果。慣用之 0—1 小時網格點雨量預報常採用 QPESUMS-QPF 之雷達觀測外延進行推估，即計算過去幾個時步之回波演進特徵，線性推估未來狀態。然而，雷達外延法無法掌握對流系統之消長，故超過 1 小時後預報能力有限。另一方面，對於 1 到 3 小時延時之預報則常仰賴高解析數值模式及雷達資料同化技術，稱為氣象署 RWRF 模式，此法利用複雜之物理方程計算大氣中各變數的演變。不論在 QPESUMS-QPF 外延法或 RWRF 數值模式中，雷達資料皆顯示了在即時預報上的重要性，但由於短時劇烈降雨天氣現象牽涉許多中小尺度對流過程，無論在學術研究亦或是實際作業面向，這些降雨預報技術現階段仍有許多挑戰與需改善之處。

無論如何，QPESUMS-QPF 外延法與 RWRF 模式可作為校驗 AI Deep-QPF 模型的最佳基準，藉由與這些基線技術 (baseline) 的比較，我們更可以了解 Deep-QPF 模型的優劣，並評估未來使用時機。因此，研究團隊收集了 2022 年全年之 Deep-QPF AI 模型、QPESUMS-QPF 外延法、與 RWRF 數值模式預報資料，並利用三個個案進行主觀分析比較 (圖 5)，包含：2022 年 5 月 26 日的鋒面個案、與 6 月 24 日及 8 月 25 日之另外兩場午後雷雨個案。

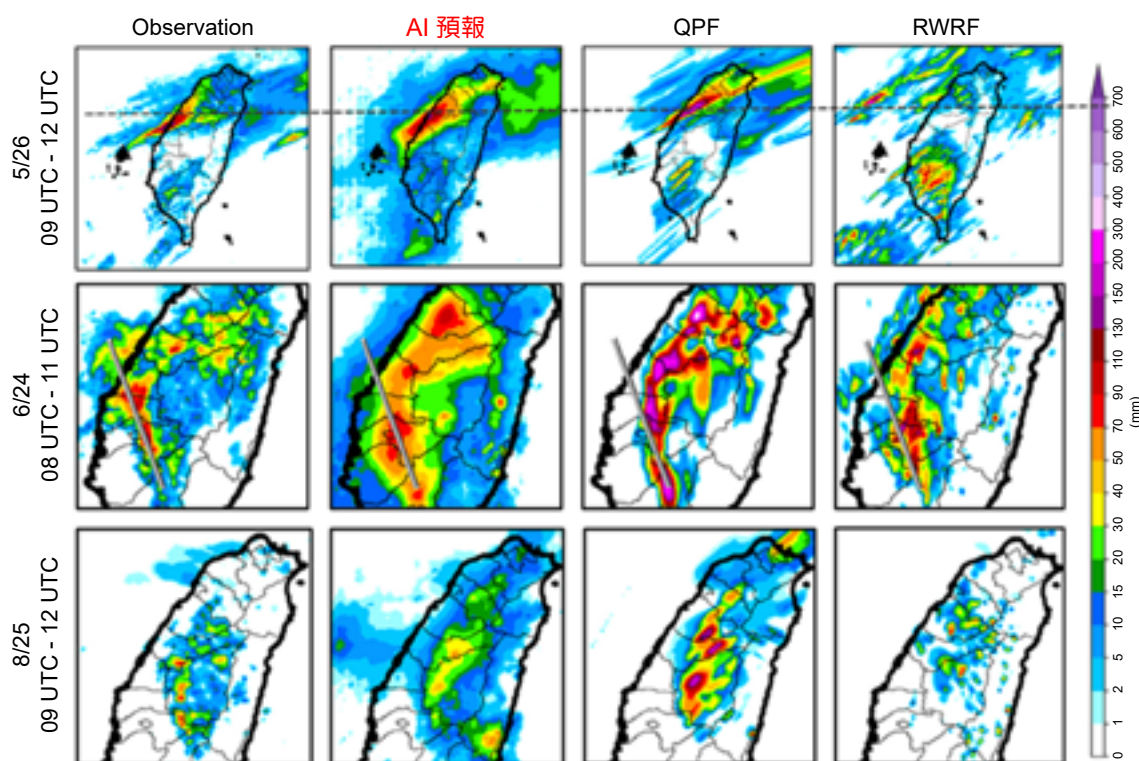


圖 5. 由上而下分別為三個不同個案，2022 年 5 月 26 日 09:00 至 12:00 UTC、6 月 24 日 08:00 至 11:00 UTC、及 8 月 25 日 09:00 至 12:00 UTC。由左至右依序為觀測雨量、Deep-QPF AI 預報、QPESUMS-QPF 外延法、及數值模式 RWRF 之 0—3 小時累積雨量預報圖。

以 2022 年 5 月 26 日鋒面通過臺灣的個案為例，數值模式 RWRF 受限於不良的初始條件 (即鋒面雨帶位置偏差) 以及模式起轉 (spin-up) 等問題，對於整個中尺度對流系統的掌握相當有限；而以雷達外延法產品 QPESUMS-QPF 來說，其大致上只能掌握對流胞在鋒面雨帶上的移動，對整個中尺度對流系統的移動缺乏能力應對，因此會呈現鋒面接近不動的狀態，錯誤預報整個鋒面雨帶的位置 (注意圖 5 第一列第三欄之降雨極值位於苗栗)，甚至會有在極值附近過報的問題；反之，在該個案中，AI Deep-QPF 模型預報的雨區不僅涵蓋觀測中鋒面雨帶掠過的區域 (注意圖 5 第一列第一、二欄之降雨極值皆位於臺中)，其降雨強度也符合觀測的量值。

再以 2022 年 6 月 24 日及 8 月 25 日之午後雷雨個案為例，RWRF 在中部地區預報的降雨極值也和觀測有所出入；而由於對小尺度對流的發展和消散無法有效掌握，QPESUMS-QPF 沒有能力提供對流胞強度變化的預測，故其預報結果有大雨過報的問題存在，除此之外也缺乏判斷雷雨隨山風像下坡移動的能力，故預報雨區太過接近山頂，然而在該降雨個案中，彰化雲林平地人口密集區的降雨應該會被更加重視。反之，Deep-QPF 模型大致掌握雷雨胞強度的改變和移動，在中部地區和嘉義的強降雨個案中都提供了不錯的強降雨預警資訊，惟 Deep-QPF 模型對 3 小時 5 mm 降雨以下之小雨區在降雨範圍有預報範圍過大的情形。

另一方面，完整的統計校驗有助於針對各項產品的整體表現有更充分的了解，故研究團隊也分析各產品的 CSI 得分 (critical success index, 圖 6(a)) 和繪製校驗效能圖 (圖 6(b))。上文進行了與 QPESUMS-QPF 和 RWRF 的比對，但僅基於三個案例。為全面了解 Deep-QPF 的優勢，本研究分析 2022 年度全年之預報結果。圖 6 顯示了 Deep-QPF、QPESUMS-QPF、及 RWRF 在 0-1-h、1-2-h、和 2-3-h 對於不同雨量門檻之預報 CSI 得分，CSI 得分介於 0 到 1 之間 (0 為沒有預報能力，1 為完美預報)，綜合考量了對於特定降雨強度之可偵測率及成功率。根據 2022 年全年事件的校驗結果顯示，RWRF 預報 (圖 6，紫線) 受限於數值模式 spin-up 的問題，第一小時累積雨量預報 CSI 得分遠不及其他兩者，第二、三小時

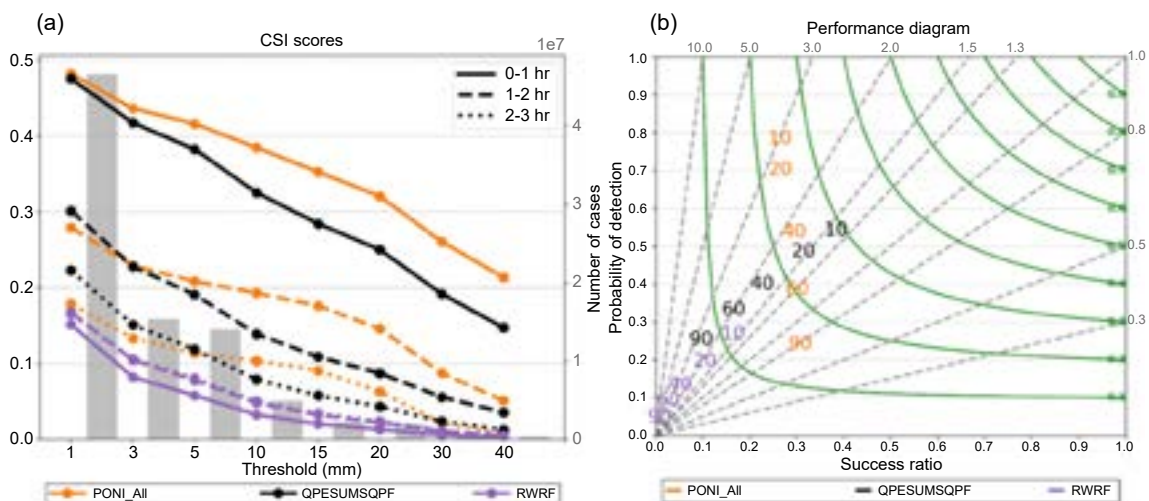


圖 6. (a) Deep-QPF、QPESUMS-QPF、及 RWRF 在 0-1-h、1-2-h、和 2-3-h 對於不同雨量門檻之預報 CSI 得分，CSI 得分綜合考量了對於特定降雨強度之可偵測率及成功率。(b) 為針對不同雨量門檻之校驗性能圖。

之小時累積雨量預報更無法作為有參考價值的極短期預報結果。QPESUMS-QPF (圖 6, 黑線) 第一小時累積雨量預報的 CSI 得分在各個降雨門檻值上的預報均不及 Deep-QPF (橘線); 而關於第二、三小時預報, QPESUMS-QPF 為延法對於小雨 (時雨量小於 5 mm) 有比 Deep-QPF 稍佳的表現, 但若針對時雨量 5 mm 以上乃至大雨的門檻, Deep-QPF 的表現依舊較 QPESUMS-QPF 佳。

校驗效能圖 (圖 6(b)) 是一種能同時評估可偵測率 (Y 軸, 對於實際發生的降雨事件所能預報到的比率) 及成功率 (X 軸, 所有預報會發生的次數中實際發生的比率) 的工具。研究團隊針對 0–3 小時累積雨量預報進行校驗效能圖分析, 進一步顯示了 AI Deep-QPF 模型主要的問題是小雨過報, 即高偵測率但低成功率, 但大雨的表現較其他產品都顯著為佳; 而雷達外延法 QPESUMS-QPF 則是在大雨門檻值的預測中成功率偏低, 並由於模式過報大雨, 使 CSI 得分不及 Deep-QPF 模型。整體而言, Deep-QPF 在未來第一、二、三小時之預報都有較佳的預報表現。

五、Deep-QPF 降雨預報之系統性誤差分析

在進行雨量預報技術開發時, 科學家長分析整年累積雨量之誤差以了解不同預報技術的系統性誤差特性。因此, 研究團隊也針對 2022 年度之觀測累積總降雨量 (圖 7(a)), 並與 Deep-QPF AI 模型、QPESUMS-QPF 外延法、及 RWRF 數值模式同期累積降雨進行比較。分析結果顯示, 以 0–1-h 累積總預報降雨量來說 (圖 7(b)-(d)), Deep-QPF 模型相對於觀測來說有最少的誤報, 其年總降水之於觀測的誤差值 (圖 7(e)) 明顯優於 QPESUMS-QPF 外延法 (圖 7(f)) 及 RWRF 模式 (圖 7(g))。進一步來看, QPESUMS-QPF 外延法對於中南部淺山地帶有過報降雨的情形, 臺灣本島上西南部平原之總降雨量過報幅度最大。另一方面, RWRF 模式由於初始場存在誤差, 對於宜蘭地區地形舉升作用導致的降雨產生低估, 進而有較低的年總降水, 而總降水差值也顯示在東北部區域的低估為三者中最為嚴重; 亦可發現, RWRF 模式具有容易把對流往山頂集中的系統性誤差。

綜合個案主觀分析、統計校驗、及年累積雨量誤差分析之結果, Deep-QPF AI 模型具備納入作業預報應用之條件, 其 0–1-h 預報表現比現行之 QPESUMS 外延法較佳, 無降雨過度預報的情形; 而 Deep-QPF 之 0–3-h 預報表現比起 RWRF 作業化預報則顯著為佳。目前, Deep-QPF 在 0–3-h 預報仍會小雨過報問題, 但相較於上一個版本的 Deep-QPF 模型, 新的版本加入額外的大氣環境異質資料已大幅地改善小雨過報的情形, 具相當程度的參考價值。

六、結論

面對短延時強降雨的預報挑戰以及防災應變, 本文介紹了由臺大氣候天氣災害研究中心與中央氣象署共組之合作研究團隊所發展的 AI Deep-QPF 即時降雨預報技術, 該 AI 模型能逐 10 分鐘更新預報一次未來 3 小時全臺及鄰近海域範圍內之降雨趨勢以及小時累積雨量, 供氣象預報員及防災人員使用, 以期改善水引致災害的監控和預警。

在模式開發過程中, 研究團隊依序測試 PONI 模組、所有異質環境資料以及局部性連接層等模式架構對時累積降雨預報表現之影響。結果顯示, PONI 模組確能整合多元的環境條

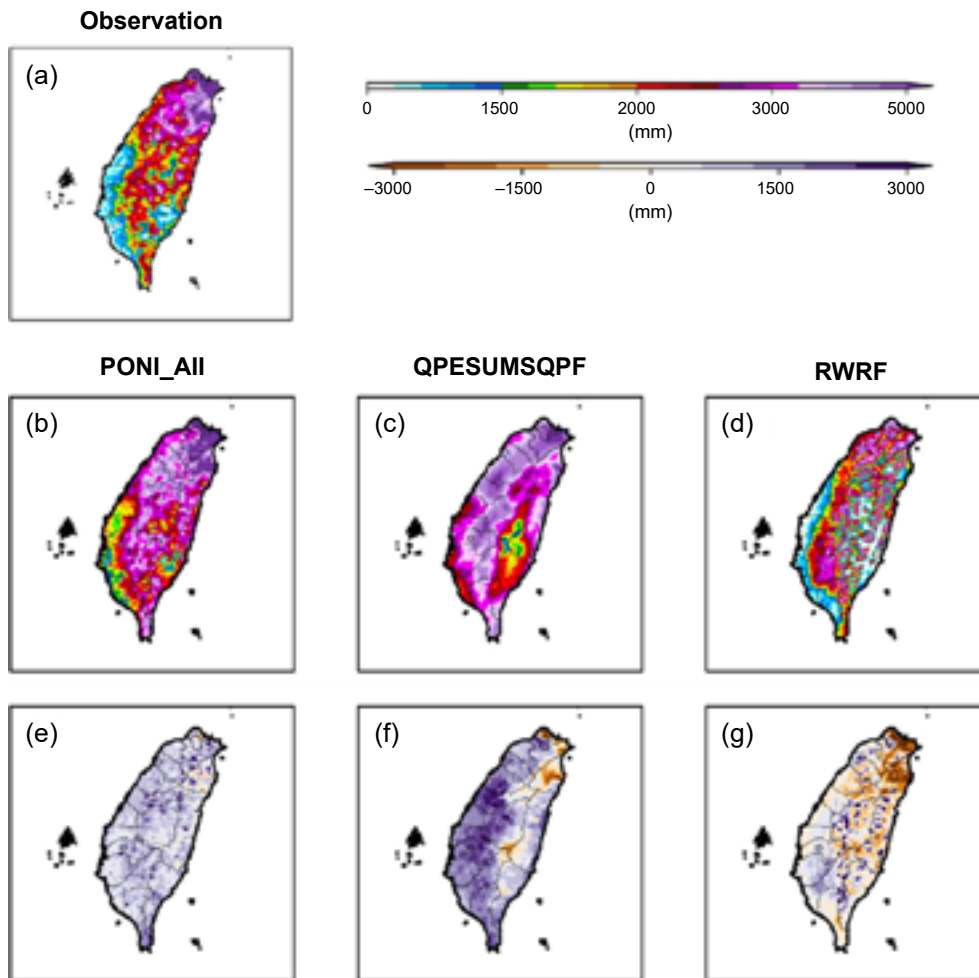


圖 7. 2022 年之年雨量觀測 (a)，以及 Deep-QPF (b)、QPESUMS-QPF (c)、RWRF (d) 預報雨量全年加總。(e)-(g) 為各模式年累積降雨與實際觀測之差值。

件並改善模式表現，此概念與人類預報員考慮多元資訊並進行降雨預報類似。更精確地說，由 PONI 模組導入資料有效地修正預報，其優勢在於強化每個輸出時間在分析時審視上一筆觀測或預報對降雨分佈的可能影響。並接著進一步加入額外異質資料之資訊，如：地形、舉升指數、季節、850-hPa 相當位溫、及 850-hPa 環境平均風，並在考量大氣環境背景資訊後，Deep-QPF 模型能有效地對第二及第三小時的降雨進行修正。PONI 模組除對小雨預報有所增益，對大雨事件預報表現更是明顯進步。此外，架構中最後導入局部性連接層，發現它能進一步修飾雨量預報圖的細節，抑制小雨過報的問題並得到更合理的累積雨量圖。

研究團隊另收集氣象署極短期與即時預報產品，包含 QPESUMS-QPF 外延預報與 RWRF 數值模式之 2022 年整年度之預報資料，並與作業化版本之 Deep-QPF 進行校驗比較。比較考量異質資料的 Deep-QPF 版本與未考量異質資料的 Deep-QPF 版本可發現，降雨預報結果雖在 0-1-h 並沒有明顯改變 (對於 0-1-h 預報，考量降雨持續/外延之特性較重要，故環境異質資料對預報改進效果不顯著)，但在 0-3-h 降雨預報中對小雨過報有顯著的改善。整體而言，比起 QPESUMS-QPF 和 RWRF，Deep-QPF 在未來第一、二、三小時之預報都有較佳的預報表現。此外，QPESUMS-QPF 和 RWRF 之系統性誤差也值得討論，例如：

前者對於線狀對流系動隨時間移動並不敏感，導致系統遲滯不前造成大雨過報；後者則是本身容易將對流聚集在山頂，若將預報時間拉長會發現鄰近山區的平地也被影響，再者由於缺乏地面觀測校正，初始條件誤差造成對東北部地區地形降水的低估。

最後，此合作研究也促成最終版本的 AI Deep-QPF 模型付諸作業化。研究團隊未來將把各類 AI 降雨預測模式在氣象署氣象預報中心作業化進行測試，即時提供予預報員使用，希望將實務預報經驗有效地在產品研發階段進行回饋。此外，研究團隊亦規劃建置有利於測試各種 AI 降雨預測之整合比較平台 (inter-comparison testbed)，導入各類前瞻 AI 降雨預報產品，並評估規劃未來進行逐 10 分鐘 0–3 小時降雨監測／預報之自動化流程，譬如：不同即時預報產品之整合與視覺化、自動化輔助工具 (短時大豪雨特報、大雷雨即時訊息、山區暴雨警告) 等。期望未來越趨多元的 AI 降雨預報產品能進一步精進臺灣的防災決策流程與精準度，發揮 AI 深度學習技術在天氣預報領域中的價值。

參考文獻

1. 陳柏孚等, "深度學習即時降雨預報技術之整合與作業化應用", 交通部中央氣象署委外案期末報告 (案號: 1122040E), (2023).
2. Ashesh Ashesh, et al., *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, **1** (3), e210005 (2022).
3. Pao-Liang Chang, et al., *Bulletin of the American Meteorological Society*, **102** (3), E555 (2021).

作者簡介

陳柏孚先生為國立臺灣大學大氣科學系博士，現為臺灣大學氣候天氣災害研究中心副研究員及大氣系兼任副教授。

Buo-Fu Chen received his Ph.D. from the Department of Atmospheric Sciences at National Taiwan University. He is currently an Associate Research Fellow at the Center of Weather and Climate Disaster Research, National Taiwan University, and an Adjunct Associate Professor in the Department of Atmospheric Sciences.

民生公共物聯網資料服務平台環境資訊數位化

Digitization and Visualization of Environmental Information on the Civil IoT Taiwan Data Service Platform

游輝宏、陳威宇、孫振凱

Hui-Hung Yu, Wei-Yu Chen, Chen-Kai Sun

財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心(以下簡稱國網中心)於「前瞻基礎建設—數位建設」中的民生公共物聯網計畫中,建置「資料服務平台」,蒐集與儲存各部會針對空氣品質、地震、水資源以及災防等領域所建置的感測資料,除提供資料供應服務外,並研發相關環境資訊數位化服務,以滿足使用者對於感測資料的視覺化資訊需求。

The National Center for High-Performance Computing (NCHC) has developed the Civil IoT Taiwan Data Service Platform, which collects and stores sensor data in four key areas: earthquake, water resource, air quality, and disaster prevention. This platform also creates services for the digitization of environmental information to meet users' needs for visual data. The Civil IoT Taiwan Data Service Platform aims to assist both the government and citizens in preparing for future environmental challenges through the digitization of environmental information.

一、背景介紹

隨著科技的進步,物聯網技術得以普及,政府機關也因此能夠透過物聯網的佈建蒐集各項環境資訊,進一步加速了政策的落地和執行,例如環境部廣泛設置微型空氣品質感測器即時監測空氣品質資料,作為稽查排放廢氣來源的同時,也將資料開放給一般民眾做加值應用,進一步提高公共安全、環境品質和健康議題的管理效能。

為整合與貼近這些與物聯網息息相關的民生公共相關務,政府在「前瞻基礎建設計畫」中,結合科技部、環境部、交通部、內政部、經濟部等部會,針對空氣品質、地震、水資源,以及災防等與民眾生活息息相關的議題,推動「建構民生公共物聯網計畫」,並透過本計畫由國網中心建置「資料服務平台」⁽¹⁾,提供穩定、高品質的感測資料供應服務,期望做為產業加值應用開發的基礎,產出能解決民眾問題之優質服務。

「民生公共物聯網資料服務平台」資料蒐錄的對象,是所有在「建構民生公共物聯網計畫」範圍內所產製的感測資料,包括空氣品質、地震、水資源,以及災防等領域,所蒐整的

資料皆採開放資料的授權方式，讓一般大眾免費介接。除此之外，也提供所儲存的歷史資料供使用者查詢和下載，截至目前，平台已累積了超過 40 項資料集，總數超過 20 億筆的感測資料。

民生公共物聯網資料服務平台的服務主要包含以 OGC SensorThings API⁽²⁾ 作為標準資料模型所提供的資料介接服務、歷史資料下載服務以及基礎圖台與資料儀表板的展示服務，本文將針對環境資訊數位化的圖台以及資料儀表板服務進行介紹。

二、環境資訊數位化

民生公共物聯網資料服務平台所蒐集並儲存之資料範圍主要包含空氣品質、水資源、地震活動、災害防救等各參與本計畫之部會所建置的感測資料，另外，也額外蒐集氣象、CCTV 以及與災害防救相關但不屬於民生公共物聯網計畫範圍內的感測資料，以提供使用者在接收感測資料時能夠一併使用。下表為目前民生公共物聯網所蒐集之主要資料集清單節錄：

表 1. 民生公共物聯網資料集清單。

提供單位	資料集名稱	資料集內容
環境部	國家空品測站	環境部設於全國之國家空品測站位置與感測資料，包含 AQI、PM _{2.5} 、CO 等空氣品質感測資料
	智慧城鄉空品微型感測器	環境部設於全國之智慧城鄉空品微型感測器位置與感測資料，主要為 PM _{2.5} 與溫濕度資料
國家科學及技術委員會	智慧園區空品測站	新竹、中部以及南部三個科學園區之空品測站與感測資料
核能安全委員會 輻射偵測中心	環境輻射即時監測資訊	提供全國輻射監測站之即時監測值
水利署 (資料來源：水資源物聯網)	河川水位站	經濟部水利署發布所屬分布於全臺灣中央管河川或區域排水之水位觀測站所觀測之即時水位資料，資料內容包括各水位站當下最新之觀測水位資料、觀測日期及時間、水位站站號等
	雨量感測器	經濟部水利署發布之雨量感測資料
	非連續性淹水感測器	經濟部水利署發布之非連續性淹水感測資料
	淹水感測器	經濟部水利署發布之淹水感測資料
	堤防結構安全測站	經濟部水利署發布之非連續性淹水感測資料堤防結構安全感測資料
	閘門	經濟部水利署發布之閘門狀態監測資料
	地下水位站	經濟部水利署發布之地下水位監測資料
水利署 (與縣市政府合建) (資料來源：水資源物聯網)	雨量感測器	水利署與各縣市政府合建之雨量感測資料
	非連續性淹水感測器	水利署與各縣市政府合建之非連續性淹水感測資料
	流量感測器	水利署與各縣市政府合建之流量感測資料
	區域排水水位站	水利署與各縣市政府合建之區域排水水位資料
	淹水感測器	水利署與各縣市政府合建之淹水感測資料
	移動抽水機	水利署與各縣市政府合建之移動抽水機狀態資料
	抽水站	水利署與各縣市政府合建之抽水站監測資料
	閘門	水利署與各縣市政府合建之閘門狀態資料

農田水利署 (資料來源：水資源物聯網)	流量感測器	農田水利署建置之流量監測資料
	埤塘水位站	農田水利署建置之埤塘水位監測資料
	農田灌溉圳路水位站	農田水利署建置之農田灌溉圳路水位資料
	閘門	農田水利署建置之閘門狀態資料
國土管理署 (資料來源：水資源物聯網)	化學需氧量感測器	國土管理署建置之化學需氧量感測資料
	污水放水量感測器	國土管理署建置之污水放水量感測資料
	懸浮固體感測器	國土管理署建置之懸浮固體感測資料
臺北市	抽水站	臺北市建置之雨水抽水站即時運轉資料
國土管理署	雨水下水道監測資料	國土管理署建置之雨水下水道水位監測資料
中央氣象署	地震儀	中央氣象署地震測站三維加速感測資料
國震中心	地震儀	國震中心建置之地震測站三維加速感測資料
中央氣象署	現在天氣觀測報告	中央氣象署現在天氣觀測報告
	自動氣象站	中央氣象署自動氣象站之氣象監測資料
	雨量站	中央氣象署自動雨量站之雨量觀測資料
環境部	空品監測即時影像器	環境部空品監測即時影像資料
水利署 (資料來源：水資源物聯網)	視訊監測影像	水利署建置之視訊監測影像資料
水利署(與縣市政府合建) (資料來源：水資源物聯網)	視訊監測影像	水利署與各縣市政府合建之視訊監測影像資料
農業部	土石流觀測站影像	農業部建置之土石流觀測站影像

上述蒐錄之民生公共物聯網資料集內容皆以 OGC SensorThings API 為標準資料模型架構進行建置，OGC SensorThings API 主要是針對物聯網感測能力所制定之標準，支援開放且具互操作性的感測資訊流通平台介面，並基於 REST 及 JSON 之網路服務標準提供資料介接服務⁽³⁾，其資料格式皆為 json 格式，而除影像類型之感測資料為 jpg 圖檔外，其餘皆為數值資料，OGC SensorThings API 的資料模型架構如圖 1，格式如圖 2。

雖 OGC SensorThings API 為具備國際標準資料模型架構的感測資料標準，且利用主流 json 格式來呈現其資料內容，然相較於一般傳統 csv 格式或層次架構簡單的 json 格式而言，其內容與架構仍較難以理解，除非在使用前先熟悉 OGC SensorThings API 的架構，因此，民生公共物聯網資料服務平台也提供了網頁版的教學文件，並針對其架構中的各項物件進行說明，如圖 3。

此外，也結合 Google Colab 可線上透過瀏覽器執行程式碼的操作方式，提供 Python 範例程式，讓使用者可直接利用這些範例程式操作民生公共物聯網資料集的介接，以協助使用者快速熟悉與了解如何透過 OGC SensorThings API 來介接民生公共物聯網資料集，如圖 4。

由於民生公共物聯網資料服務平台的主要目的是協助使用者利用平台提供的環境資料進行各類加值應用服務，因此，所收集和提供的感測資料主要以原始數據資料服務為主。對於環境資料的視覺化展示，平台主要呈現各觀測站的原始數據資料，並輔以現有的各類圖資資料，以方便使用者通過視覺化方式瀏覽感測資料的實際數值。以下將詳細說明針對不同應用情境的環境資訊視覺化設計。

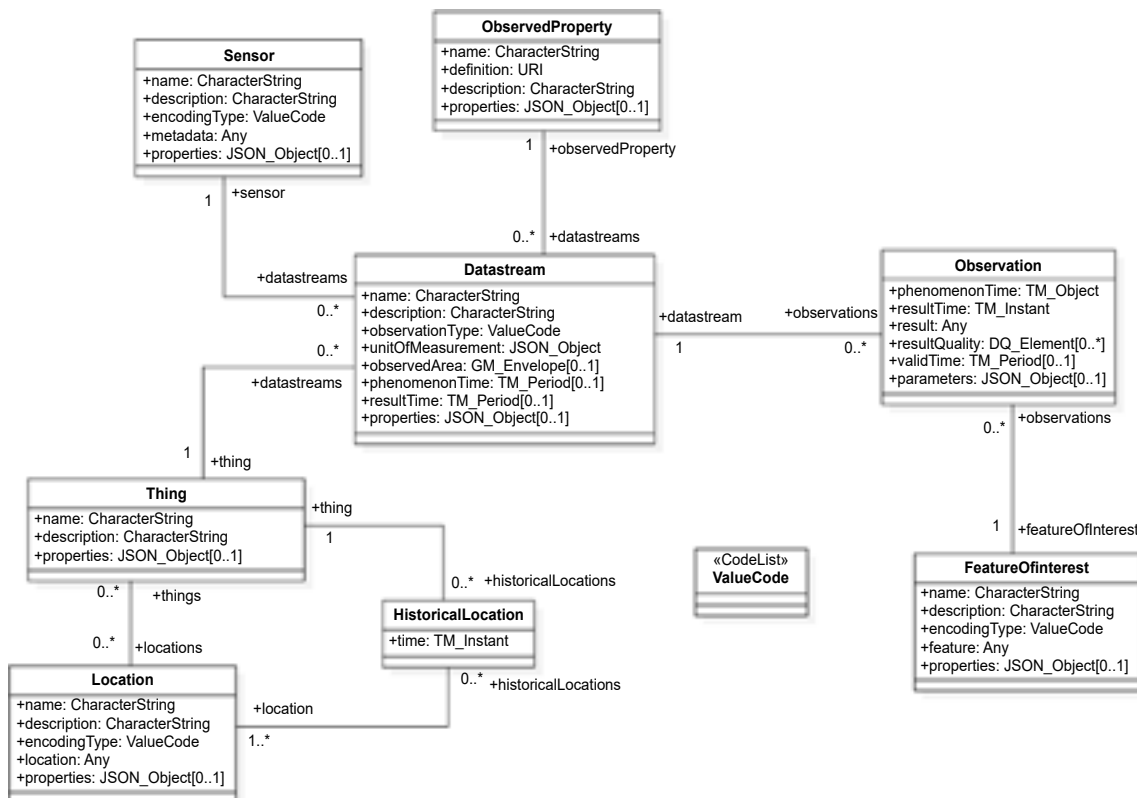


圖 1. OGC SensorThings API 架構 (參考來源：<https://docs.ogc.org/is/18-088/18-088.html>)。

```

{
  "list_count": 10000,
  "value": [
    {
      "list_selfLink": "https://sta.ci.taiwan.gov.tw/STA_AirQuality_IPA2/v1.0/Datastreams[1]",
      "list_id": 1,
      "description": "總懸浮微粒 PM2.5",
      "name": "PM2.5",
      "observationType": "http://www.opengis.net/def/observationType/OGC-09/1.0/PM_Measurement",
      "observedArea": {
        "type": "Point",
        "coordinates": [
          121.44754,
          25.40076
        ]
      },
      "phenomenonTime": "2024-10-26T00:00:00.000Z/2024-10-26T00:00:00.000Z",
      "resultTime": "2024-10-26T00:00:00.000Z/2024-10-26T00:00:00.000Z",
      "unitOfMeasurement": {
        "name": "microgram per cubic meter",
        "symbol": "ug/m3",
        "definition": "https://xrechnung.kbafredictionary.com/ug3m3"
      },
      "thing": {
        "list_selfLink": "https://sta.ci.taiwan.gov.tw/STA_AirQuality_IPA2/v1.0/Things[1]",
        "list_id": 1,
        "description": "智慧環境品質監測站-773713222",
        "name": "智慧環境品質監測站-773713222",
        "properties": {
          "city": "基隆市",
          "areaType": "環境空氣品質",
          "latitude": "25.13",
          "longitude": "121.75",
          "altitude": "100",
          "isPublic": "True",
          "stationID": "773713222",
          "locationId": "773713222",
          "description": "智慧環境品質監測站-773713222",
          "phenomenonTime": "2024-10-26T00:00:00.000Z/2024-10-26T00:00:00.000Z",
          "stationName": "智慧環境品質監測站-773713222",
          "areaDescription": "內政部建設局"
        }
      },
      "observationCount": 300,
      "observations": [
        {
          "list_selfLink": "https://sta.ci.taiwan.gov.tw/STA_AirQuality_IPA2/v1.0/Observations[447813222]",
          "list_id": 447813222,
          "phenomenonTime": "2024-10-26T00:00:00.000Z",
          "resultTime": "2024-10-26T00:00:00.000Z",
          "result": 4.56
        }
      ]
    }
  ]
}

```

圖 2. OGC SensorThings API 資料格式。

▼ 範例1-查詢環境部智慧城鄉空品微型感測器所有感測器基本資料

```
[2] #
# 查詢環境部智慧城鄉空品微型感測器所有感測器基本資料
# DemosThings API: https://sta.colife.org.tw/STA_AirQuality_EPAIoT/v1.0/Things
#

import requests
import json
import urllib3
import datetime

urllib3.disable_warnings()

print("begin time: ", datetime.datetime.now())

# 取得 API 的回應
response = requests.get("https://sta.colife.org.tw/STA_AirQuality_EPAIoT/v1.0/Things", verify=False)

# 解析 JSON 格式的回應
data = json.loads(response.content)

# 取得資料總筆數
count = data["@total.count"]
#print(count)

n = 0

# 取得前100筆資料
for item in data["value"]:
```

圖 4. 透過 Google Colab 以範例程式碼介接民生公共物聯網資料。

如圖 5，本平台的圖台基於 OpenLayers⁽⁴⁾ 建置，並支援開放地理資訊學會 (Open Geospatial Consortium, OGC) 的國際主流 GIS 相關圖資格式標準 (如 SHP、GeoJSON、KMZ、KML 等)。平台提供 Windy⁽⁵⁾、國土測繪中心之臺灣通用電子地圖與國土測繪中心正射影像 (混合)⁽⁶⁾、OpenStreetMap⁽⁷⁾ 等四種圖層，使用者可以根據需求設置地圖底圖。

圖台開發基於 Leaflet⁽⁸⁾，在處理像是智慧城鄉空品微型感測器等大量感測設備位置標記的資料時，使用 Markercluster 套件⁽⁹⁾ 將測站座標群組化，以有效管理大量地圖標記，從而在地圖上展示大量位置資訊變得更加容易和直觀。使用者可以先檢索測站位置資料，選擇欲查詢的區域並點擊該地圖標記，以查閱該測站的觀測資訊。

此外，如圖 6，Windy 圖台已內建風速、風向等氣象資訊，為了在颱風、豪雨、空氣污染等環境劇變時，提供使用者快速瀏覽相關環境資訊的能力，民生公共物聯網資料服務平台的地圖視覺化功能不僅提供水、空、地、災等原始感測資料，還整合了各種外部資訊以提供使用者整合性的空間資料瀏覽方式。以下分別介紹各項感測資料的數位視覺化成果：

■ 智慧城鄉空品微型感測器

民生公共物聯網的空氣品質資料集提供了不同特定區域的即時空氣品質數據。這些數據由分布在不同位置的感測器收集，感測器能夠測量空氣中的多種污染物，如 PM_{2.5}、PM₁₀ 和臭氧 (O₃)。除了全國 77 個國家空品測站外，還包括環境部在全臺工業區、交通區及人口稠密住宅區設置的多達 1 萬個智慧城鄉空品微型感測器。這些感測器在節省成本的前提下，能夠廣泛且密集地部署，用於監控空氣品質，並作為環境部稽查非法排放廢棄工廠的重要資料來源之一。

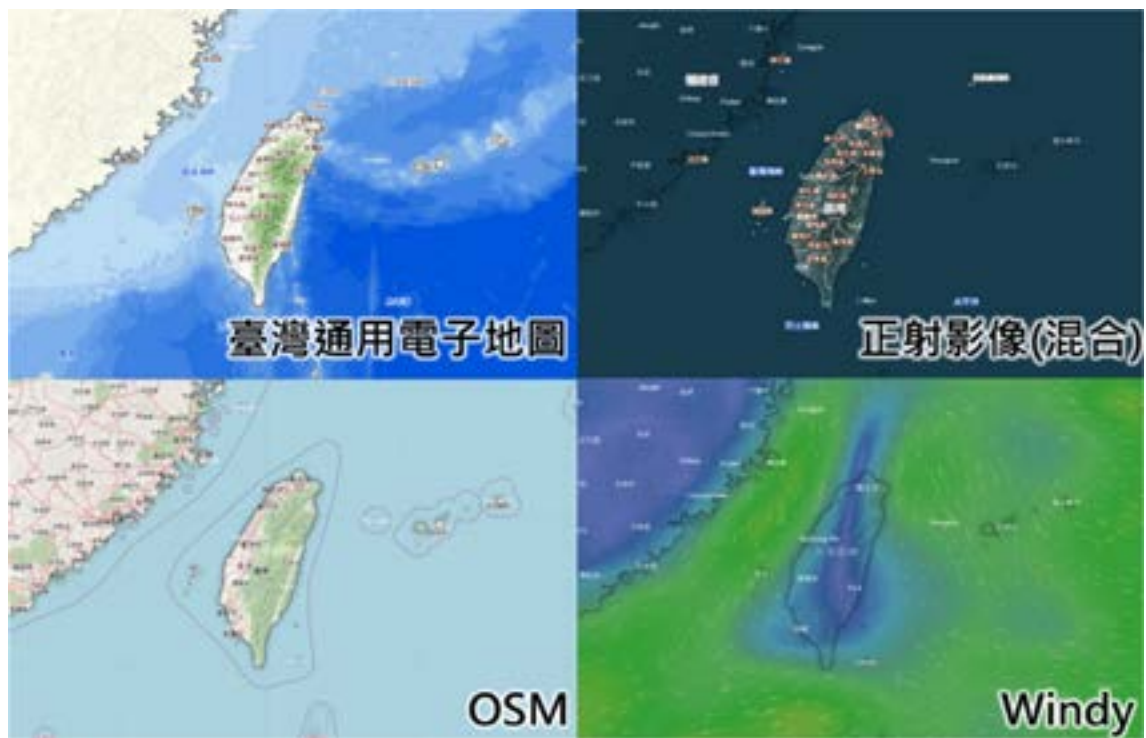


圖 5. 民生公共物聯網資料服務平台之圖台底圖切換功能。

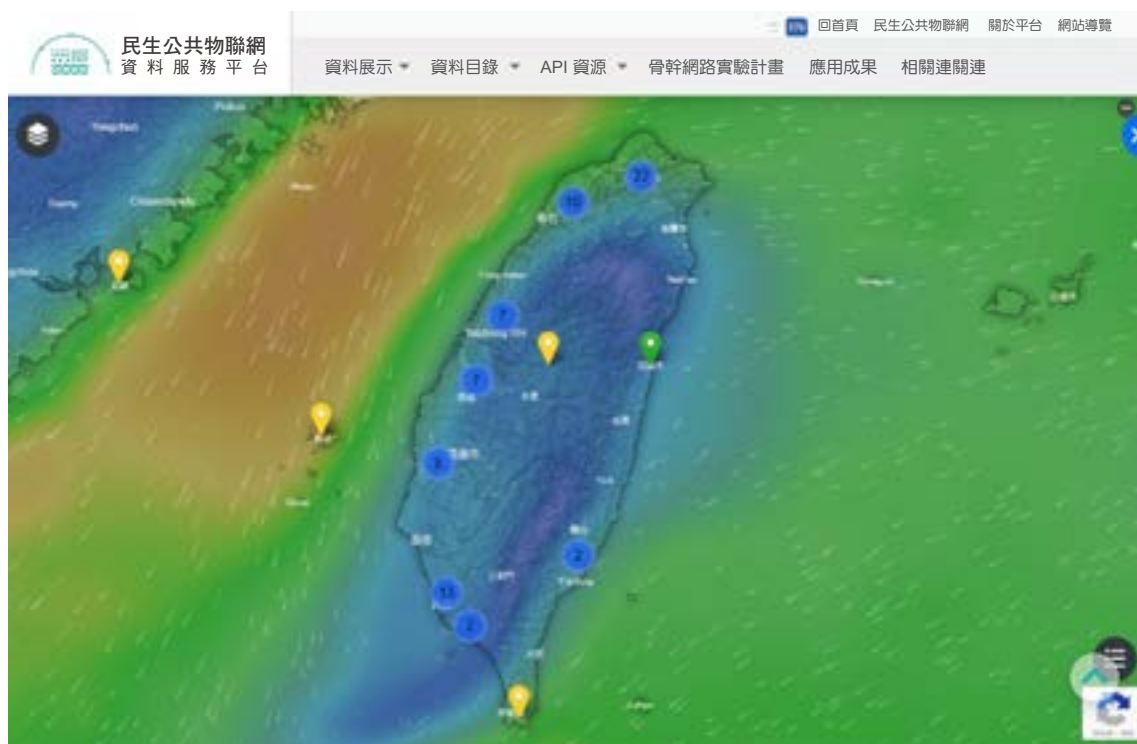


圖 6. MarkerCluster 功能展示圖。

透過整合智慧城鄉空品微型感測器的資料，本平台提供了一個直觀的介面，允許用戶查看特定區域的空氣品質資料。使用者還可以選擇不同感測器的數據來比較不同地區的空氣品質，並使用資料儀表板查看過去 24 小時的空氣品質趨勢分析，如圖 7。

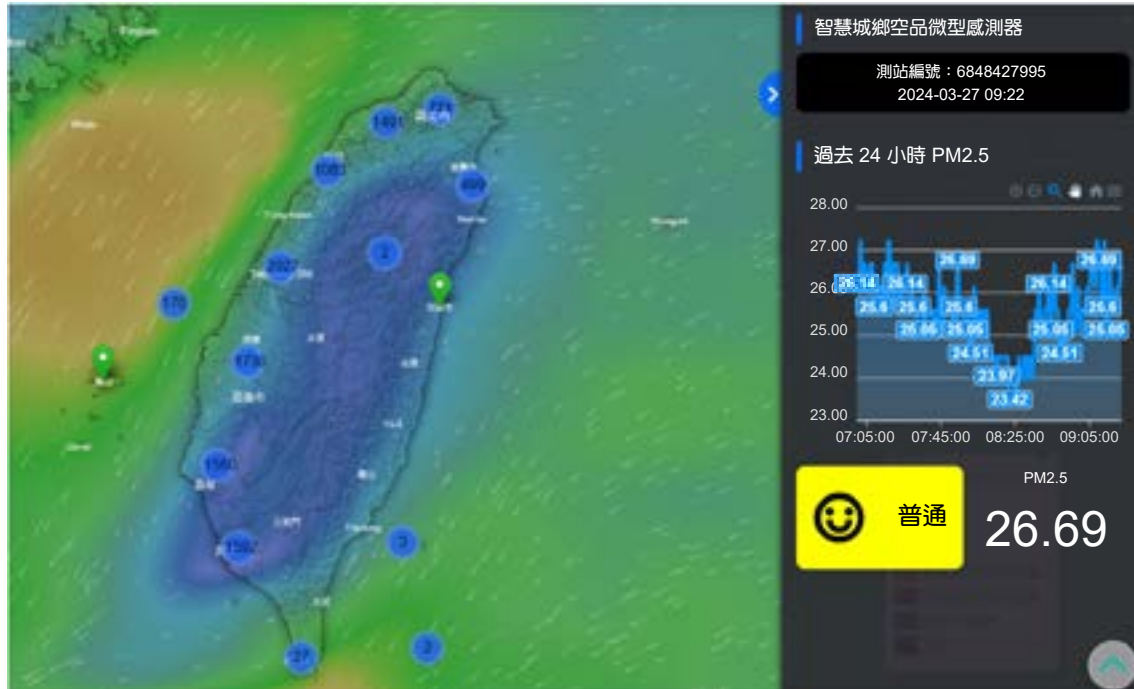


圖 7. 智慧城鄉空品微型感測器圖層。

■ 空品預報模擬資料

為了提供環境部等主管機關針對 $PM_{2.5}$ 等空氣品質污染物之預報與管理，以適時針對空氣污染進行適當的處置與示警，中研院環境變遷研究中心與國網中心合作，由國網中心提供臺灣杉三號運算資源，透過中研院高解析度空氣品質診斷與預報模式計畫發展符合臺灣環境需求的高解析度空氣品質模式⁽¹⁰⁾，並使用臺灣杉三號將近 2 千個計算核心進行每日全台 3 公里解析度、未來 72 小時的空氣品質預報模擬分析計算，以期提供主管機關作為空氣污染處置的施政參考，進而減緩空氣品質惡化的衝擊，保障民眾的健康。而此空氣品質模擬計算結果也透過民生公共物聯網資料服務平台開放公眾以學術研究性質使用。

由於 Windy 平台本身具備時間軸播放功能，因此本平台整合了中研院高解析度空氣品質模式所模擬的未來 72 小時包含 $PM_{2.5}$ 、 O_3 以及風向等計算結果，將之套疊於 Windy 圖台中，如圖 8，使用者可透過圖台的時間軸自動播放功能查看未來 72 小時空氣品質的變化情形。

■ 地震

民生公共物聯網的地震資料來源主要來自中央氣象署和財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心。所收集的地震資料為地震發生後，以震央為中心向外擴散、且有偵測到地震震波的各地震儀三軸加速度資料，由於此資料為地震發生當下的地震儀資料經處理後所產



圖 8. 中研院高解析度空氣品質模式模擬計算展示。

生，因此並非即時發生的地震訊息，多為地震研究時會用到的研究資料。

如圖 9，本平台整合來自中央氣象署和國家地震工程研究中心的地震儀資料，並通過圖層展示最新地震事件中，各地震儀感測器的分佈及其地震資訊。這些資訊包括測站名稱、地震編號、地震深度、地震規模、地震時間以及三軸加速度資料等。

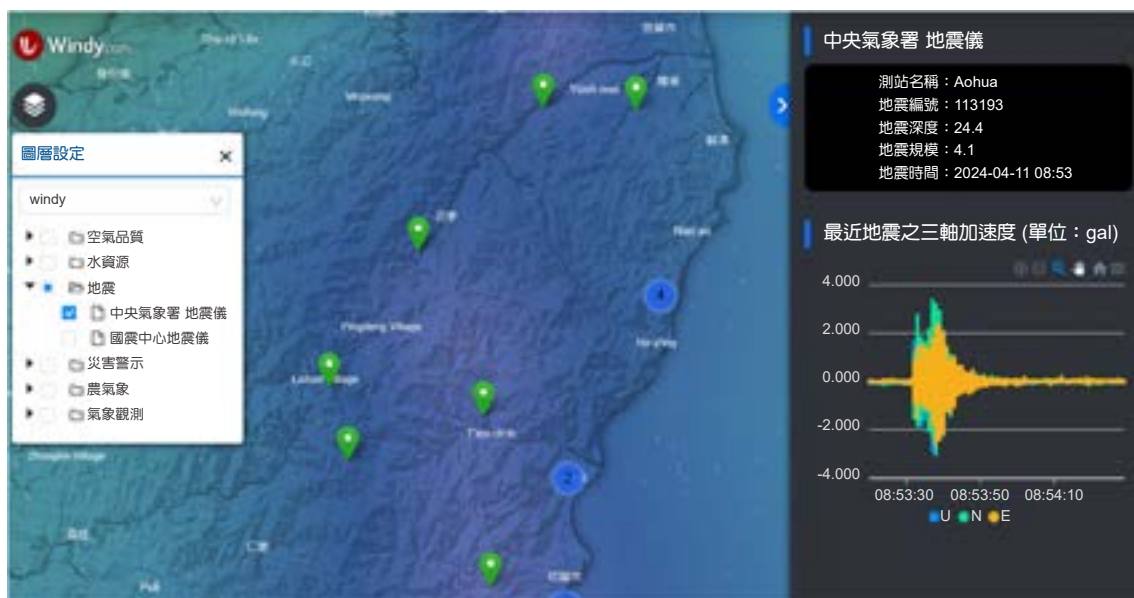


圖 9. 地震圖層。

■ 水資源

水資源資料集主要來源為經濟部水利署的水資源物聯網，產製單位除了水利署外，也包含水利署與各縣市合建的相關感測器，資料類別則包含河川水位、區域排水水位、淹水感測器、開門以及流量感測器等，如圖 10。此外，也和農田水利署合作，介接農田灌溉圳路水位站、埤塘水位站等感測資料，可藉此了解農田灌溉用水相關資料。

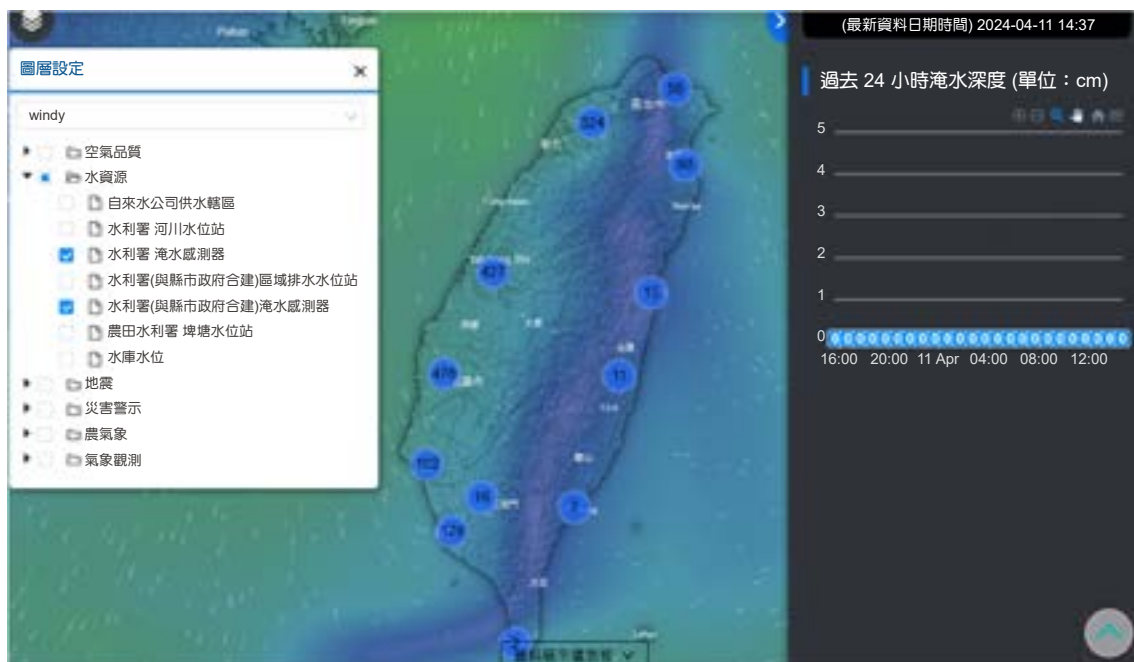


圖 10. 水資源圖層。

為了因應氣候變遷所帶來的水資源調配挑戰，需要增加更多的水資源相關資料以提供更完整的資訊，因此在民生公共物聯網資料服務平台的圖台也整合了水庫基本資料及水庫水情資訊，於圖台進行資料展示，如圖 11。水庫基本資料包含水庫名稱、水庫編號、機關名稱、功能、地區別等六種資料，而水庫水情資訊包含觀測時間、目前有效蓄水量、集水區累積降雨量、有效蓄水量、水庫水位、狀態別等相關資訊。

透過水庫水情資訊的目前有效容量及有效蓄水量資訊，可計算出目前水庫水位百分比，其計算公式為有效蓄水量 / 目前有效容量 = 目前水位百分比 (若超過 100%，將以 100% 顯示)，這些資料以圓餅圖的方式進行可視化展示，讓使用者可清楚快速的了解目前水庫水情狀況。

■ 颱風警示圖層

本平台整合中央氣象署的颱風資訊，包括預測颱風位置時間、颱風路徑、颱風消息、近中心最大陣風等，另外介接民生示警公開資料網站 (CAP)，當有發布颱風災害警戒資訊時，則會於圖台上自動顯示颱風警戒之提示訊息，如圖 12，民眾可同時瀏覽這些資訊以及民生公共物聯網資料服務平台上的水資源相關感測資料，如河川水位、淹水感測器等，以即時掌握氣象與水資源相關感測資料的相對關係。

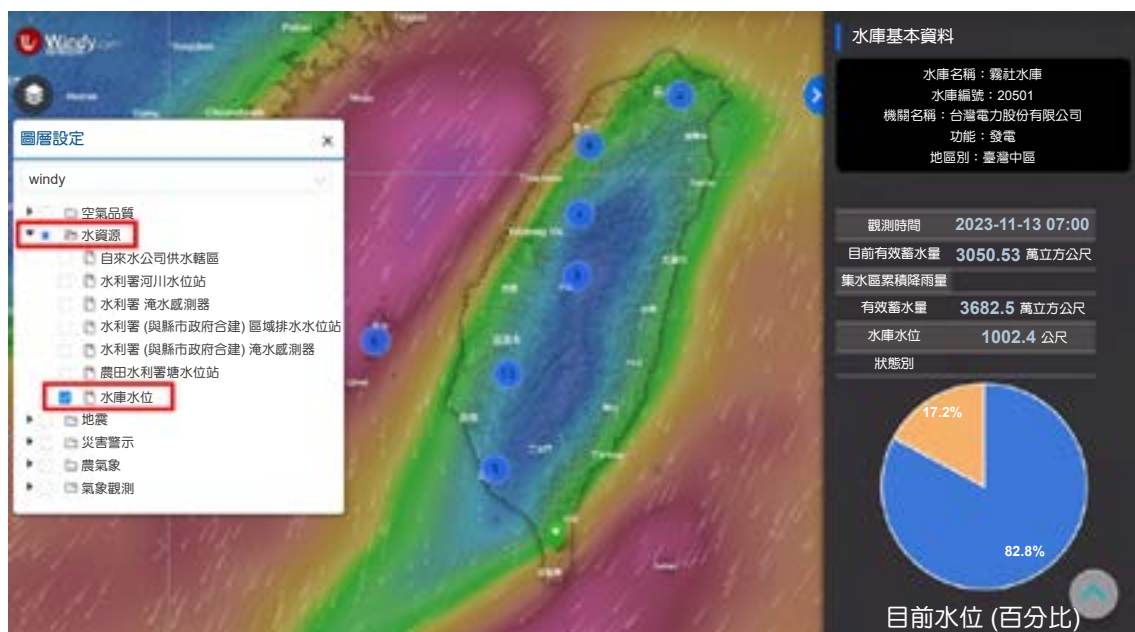


圖 11. 水庫即時水位資訊示意圖。

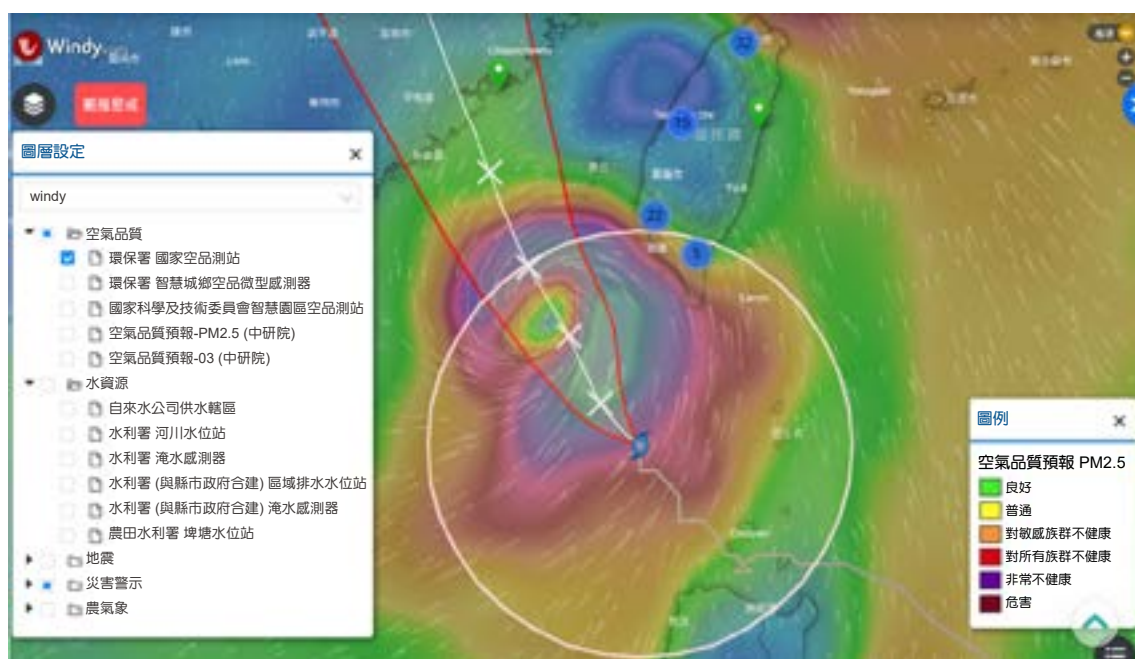


圖 12. 颱風警示圖層。

■ 氣象觀測－即時雷達回波圖

國家災害防救科技中心 (National Science and Technology Center for Disaster, NCDR) 利用模式修正外延法 (ExAMP) 推估未來 1 小時雷達回波移動狀況，生成水平空間解析度約 2.6 公里、時間為每 10 分鐘一張空間圖的雷達回波圖，如圖 13 所示，而民生公共物聯網資料服務平台將這些回波資料整合於地圖式瀏覽功能，方便使用者可透過視覺化界面了解可能的降雨資訊 [https://watch.ncdr.nat.gov.tw/watch_api_open]。

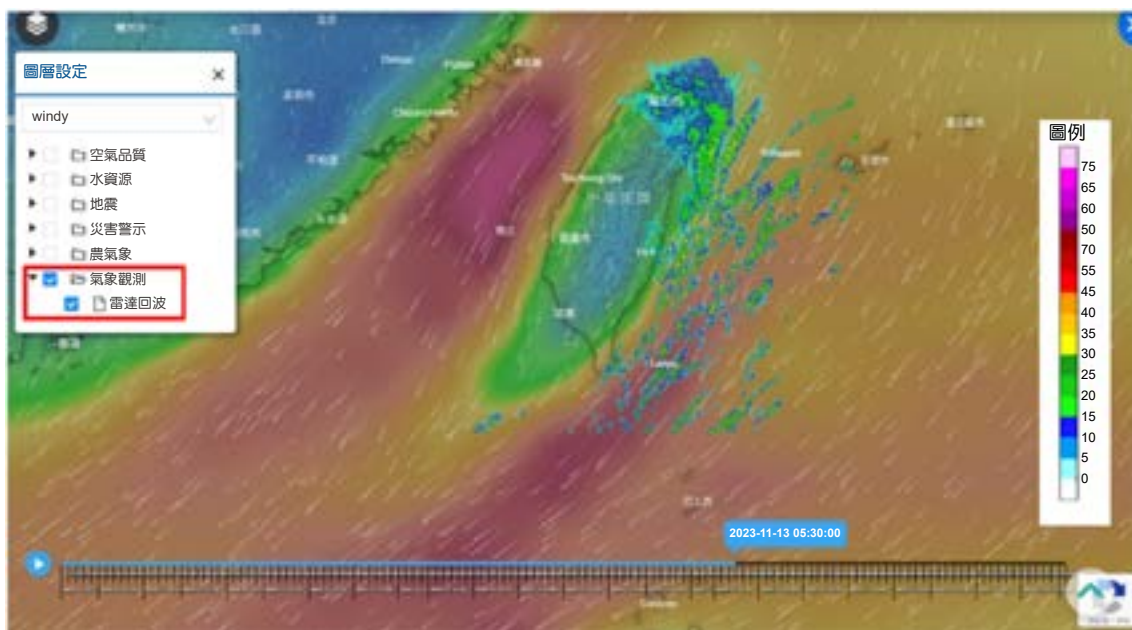


圖 13. 未來 1 小時雷達回波圖層。

2.2 感測資料儀表板

除了前述以空間圖台呈現的感測資料之外，為了強化民生公共物聯網資料服務平台提供原始感測資料的定位，另外針對主要資料集建置資料儀表板，透過資料儀表板展示原始的即時與歷史資料，且能藉由分區分地的方式，提供使用者貼近所在區域的感測資料現況。

本平台的資料儀表板主要以開源的 **Grafana**⁽¹¹⁾ 資料視覺化應用平台開發，**Grafana** 具備豐富的儀表板選擇，可利用文字、圖表、地圖、時間序列等資料視覺化工作來展示時序或一般資料。同時，**Grafana** 允許使用者將已建置完成的圖表分享或嵌入到其他網站中，提供資料儀表板的網路服務，從而幫助使用者節省資料展示的開發成本。以下將分別介紹各資料儀表板內容。

■ 環境部國家空品測站－資料展示儀表板

如圖 14，環境部國家空品測站全台共有 77 個測站，感測項目包括 AQI 空氣品質指標、PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、NO₂ 等影響空氣品質的相關感測項目，測站詮釋資料因為包含空品區、縣市以及測站名稱等資訊，因此資料儀表板提供使用者可任意選擇空品區、縣市以及測站名稱來檢視資料的功能。

在資料儀表板的資料展示設計上，將使用者最在意的 AQI 空氣品質指標以及 PM_{2.5} 細懸浮微粒，以測量計 (gauge) 的方式呈現在儀表板第一層最上方，並透過環境部的空氣品質指標分級標準，搭配以不同顏色區隔，使用者可一目了然目前的空氣品質是否已超標或維持在標準範圍內。儀表板第一層左方則以地圖方式呈現全台 AQI 以及 PM_{2.5} 超過一定標準的測站，讓使用者可透過地圖方式一次檢視所有數值超標的測站。

資料儀表板的第二層以後的資訊，則提供各感測項目的時序資料，使用者可透過此圖表檢視某一段時間內的感測資料變化。最下層則以表格方式提供原始數值資料，使用者甚至可透過 **Grafana** 所提供的功能，將感測數值下載。

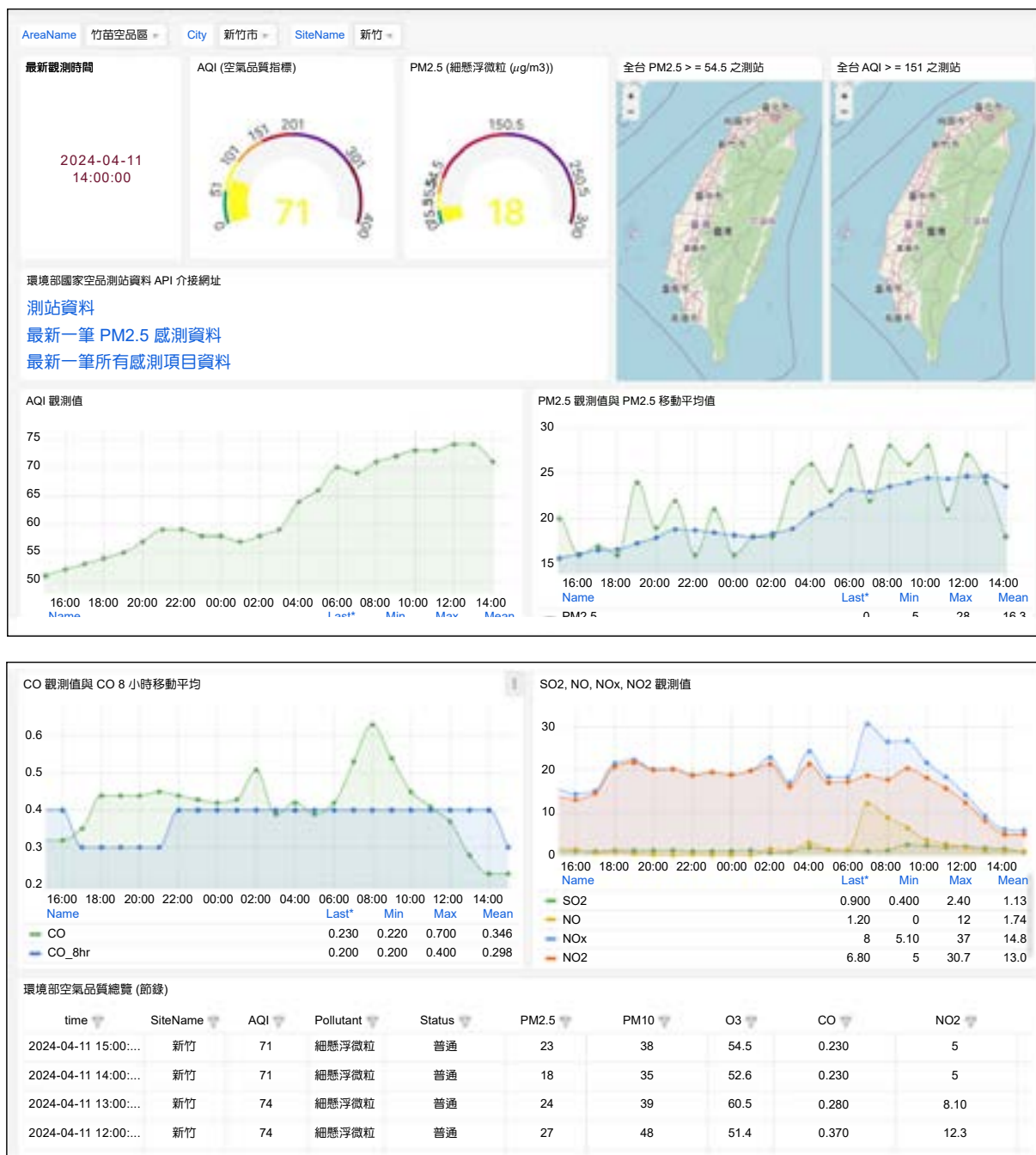


圖 14. 環境部國家空品測站－資料展示儀表板。

■ 水資源資料展示儀表板

如圖 15，水資源感測資料的來源涵蓋水利署、水利署與各縣市政府合建以及農田水利署等，資料類別則包含河川水位、區域排水水位、淹水感測器、閘門以及流量感測器、農田灌溉圳路水位站、埤塘水位站等，在選單上無法像環境部國家空品測站一樣以縣市或測站等方式提供篩選，因此其篩選方式主要以資料來源以及資料類別來作為選單的選項。



圖 15. 水資源資料展示儀表板。

由於資料類別眾多，加之各資料類別的感測器數量以及感測物理量數量眾多且不一，故在資料展示儀表板的設計，難以針對各不同感測項目作為資料展示，因此在資料儀表板的第一層先呈現各資料類別的相關資料，包括建置的感測器數量、物理量數量以及清單，並透過右方地圖方式展示各測站資料。而在儀表板最下層，左方以表格方式列出各資料類別之測站清單，右方則列出各測站的物理量、物理量單位以及感測值。

■ 縣市相關資訊整合展示儀表板

在圖 16「縣市相關資訊整合展示儀表板」中，資料的呈現主要以各縣市為篩選清單，第一層先展示各縣市所建置的感測器數量，讓使用者可快速了解各縣市感測器佈建狀況。第二層則列出國家災害防救科技中心所提供的民生示警公開資料 (Common Alerting Protocol, CAP)⁽¹²⁾，民生示警公開資料主要以文字方式呈現即時的災害訊息，包含颱風、地震、海嘯、停班停課、交通警示等各類資訊，以提醒民眾針對各類示警訊息進行因應工作。至於第三層以後的資料儀表板，則以地圖方式展示包括空氣品質、降雨以及淹水等民眾較為關切的資訊。總而言之，此儀表板的設計以縣市為出發點，總和呈現各環境相關資訊。

三、結論

本篇主要介紹民生公共物聯網在空氣品質、水資源、地震以及防救災等環境資料的數位化展示介紹，分別以圖台、時間軸動畫以及資料儀表板等方式提供使用者在不同面向的資料瀏覽方式，由於以呈現感測資料的原始數據為主要目的，因此並未提供更多加值的資料展示內容，也藉此與資料權責機關、產業界以及自發性的民間社群所提供的資料展示服務有所區隔，並提供民眾正確的環境資訊。

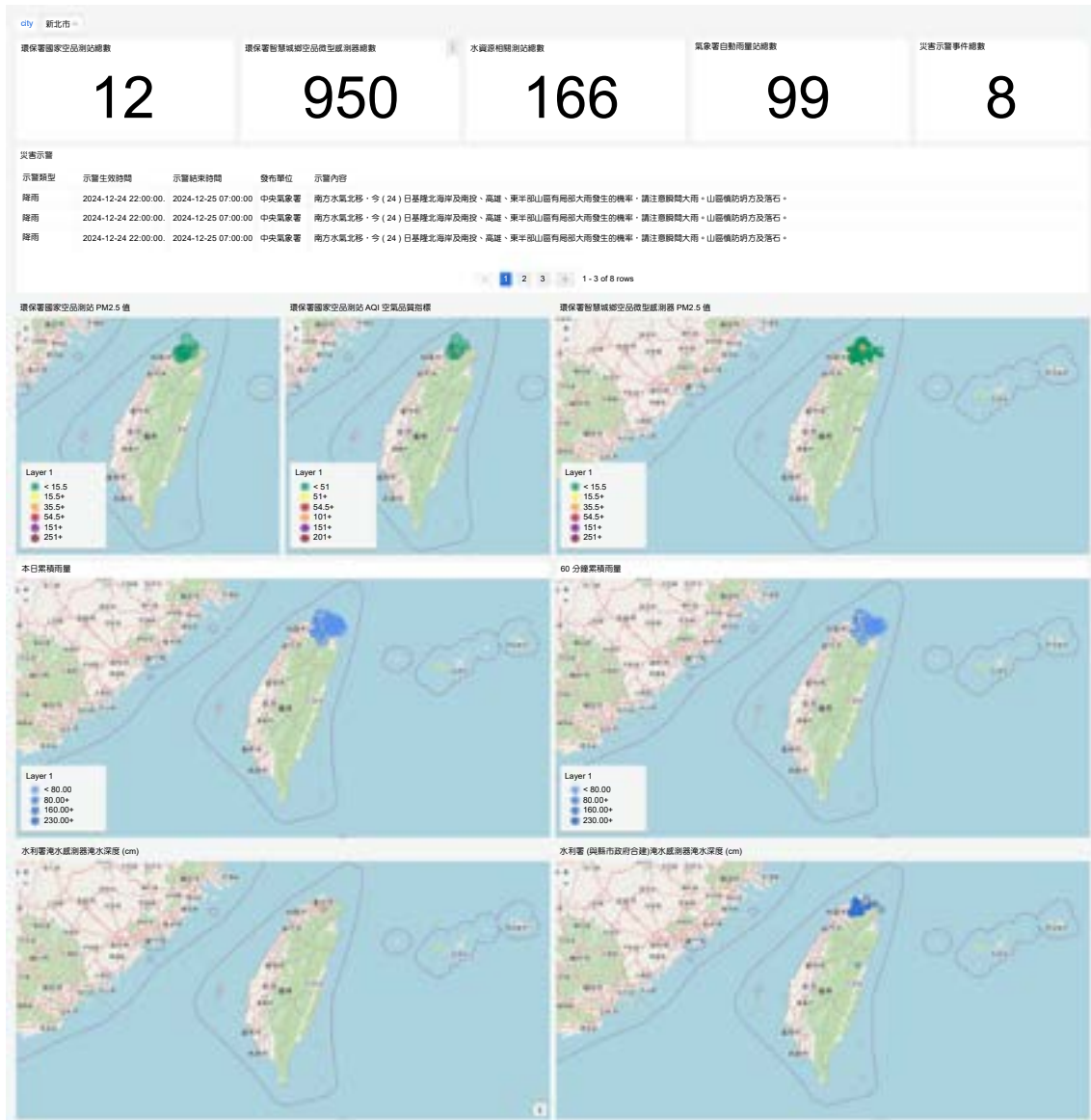


圖 16. 縣市相關資訊整合展示儀表板。

參考文獻

1. 民生公共物聯網資料服務平台, please refer to the website: <https://ci.taiwan.gov.tw/dsp>
2. OGC SensorThings API, please refer to the website: <https://www.ogc.org/standard/sensorthings/>
3. 游輝宏、林錫慶、尚榮康、黃智遠, 民生公共物聯網資料服務平台之開發建置, 2020 臺灣地理資訊學會年會暨學術研討會(2020).
4. OpenLayers, please refer to the website: <https://openlayers.org/>
5. Windy, please refer to the website: <https://www.windy.com/>
6. 國土測繪圖資服務雲, please refer to the website: <https://maps.nlsc.gov.tw/>
7. OpenStreetMap, please refer to the website: <https://www.openstreetmap.org/>
8. Leaflet, please refer to the website: <https://leafletjs.com/>
9. Leaflet Markercluster, please refer to the website: <https://github.com/Leaflet/Leaflet.markercluster>
10. 中研院環境變遷研究中心-空氣品質專題中心-資料櫥窗, please refer to the website: <https://rcec.sinica.edu.tw/?action=research&cid=2&ntype=4>
11. Grafana, please refer to the website: <https://grafana.com/>
12. 國家災害防救科技中心民生示警公開資料, please refer to the website: <https://alerts.ncdr.nat.gov.tw/>

作者簡介

游輝宏先生現為財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心副研究員。

Hui-Hung Yu is currently an Associate Researcher at National Center for High-performance Computing, Narlabs.

孫振凱先生現為財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心工程師。

Chen-Kai Sun is currently an Engineer at National Center for High-performance Computing, Narlabs.

陳威宇先生現為財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心副研究員。

Wei-Yu Chen is currently an Associate Researcher at National Center for High-performance Computing, Narlabs.

微型感測器讀取電路與系統

Micro Sensor Readout Circuits and Systems

林奕成、蔡淑如、陳柔甄、蕭文澤、陳峰志

Yi-Cheng Lin, Shu-Ju Tsai, Rou-Jhen Chen, Wen-Tse Hsiao, Fong-Zhi Chen

本篇文章深入介紹微型氣體感測器讀取電路與系統的開發，該系統針對半導體式電阻型氣體感測材料應用進行設計，包括金屬氧化物、二維材料及奈米材料化合物等薄膜，這些材料因其高靈敏度、快速響應及對各種氣體的選擇性而被廣泛應用。本系統設計強調可配合不同材料特性的響應變化需求，從而提升對多種氣體的檢測精度與穩定性，進行電阻值變化的精準量測與校正。

This article introduces micro gas sensor readout circuits designed for semiconductor resistive gas sensing materials, including metal oxides, two-dimensional materials, and nanomaterials. Known for their high sensitivity, fast response, and selectivity, these materials enhance detection accuracy and stability by matching the system's response to different material properties, accurately measuring and correcting resistance changes.

一、微型化感測器背景與市場分析

根據市調機構 Persistence Market Research 市場報告指出，移動物聯網 (cellular internet of thing) 市場預估從 2018 年至 2026 年的複合年增長率為 26.7%⁽¹⁾。Cellular IoT 提供先進連接技術，可將數十億物聯網設備連接到全球互聯網。使用的通訊技術包含：4G、5G 與低功率廣域 (low power wide area, LPWA) 移動技術 (NB-IoT、LTE-M)。其中 NB-IoT 為新興移動技術之一，可實現高效通信、延長大規模分佈式設備的電池壽命、降低能耗，並降低廣泛地理覆蓋範圍成本。同時可連接數百萬台裝置設備、感測器進行服務。NB-IoT 應用包括：智慧停車、智慧城市、智慧農業、工業監控、煙霧探測等需求浮現。此外，LTE-M (用於機器的 LTE)，利用移動運營商的 4G LTE 網絡基礎設施的物聯網 LPWA 技術。可應用在：資產跟蹤、智慧手錶、健身帶、電／水錶與寵物跟蹤。

由通訊基礎建設的成長可知，帶動雲端、通訊、穿戴型裝置及物聯網 (internet of thing, IoT) 等新興產業應用快速發展，促使感測器元件與感測器用材料開發。國際研究顧問機構 Gartner 統計新興技術發展週期，產品發展約略可分為五階段，包括：科技誕生的驅動期、過高期望的高峰期、想像幻滅的低谷期、穩步回升的光明期與技術成熟能實質生產的高原期。圖 1 為 Gartner 市調機構統計在 2013—2020 年各項新興技術的演進歷程⁽²⁻⁵⁾。由圖中得知物聯網 (internet of things)、巨量資料 (big data)、雲端運算 (cloud computing)、感知

(sensing)、人工智慧 (artificial intelligence)、超越矽 (beyond silicon) 等技術，成為全球最熱門的技術，發展週期達 10 年以上。因此，在這些技術加持下，具備輕 / 薄 / 短 / 小 / 省電與多功能之感測器用材料與感測器元件開發在此扮演重要角色且成為大廠躍躍欲試的明星產品。

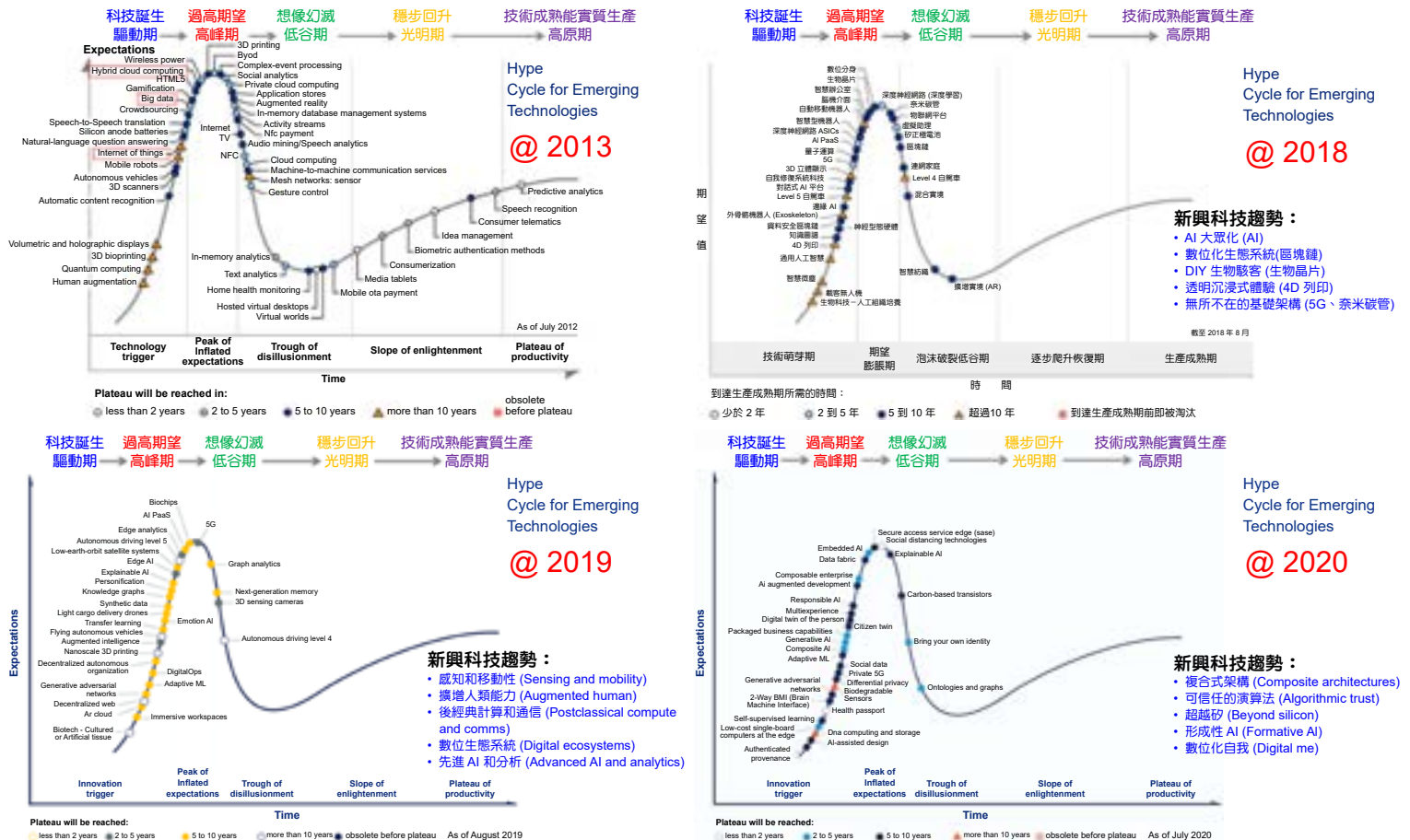


圖 1. 新興技術週期 (2-5)。

感知層為 IoT 架構之下最底層元件 (感測器)，透過感測器材料 (薄膜) 的基本物理特性如：光、聲、電、熱、力、磁等並與時間/空間資訊結合，將所量測到的物理量進行資訊傳遞並進行監控。以感測器為例可應用於下列產業：3C 產業 (智慧型手機、觸控面板)、車用電子 (安全氣囊、胎壓偵測、輔助駕駛、汽車導航)、醫療電子 (生理信號監控、居家照護)、智慧聯網 (交通運輸、公共建設、環境保護)、環境監控 (PM_{2.5})、設備監控 (預警) 等⁽⁶⁻⁸⁾。以氣體偵測器為例，行政院環境部於全國各地的監測站大多使用標準大型儀器設備 (如：NO₂ 氣體使用 Ecotech 9841、SO₂ 氣體使用 Ecotech 9850 等)。然而，面臨氣候快速變異的環境下，使用標準儀器來密集佈點進行偵測，在實際的情境上來應用實施實則困難。因此，透過發展微型化氣體感測器進行廣佈，以撒網的概念將有利於汙染熱點的搜尋。為此，微型化的氣體感測器開發參考應用情境相關法規，如空氣品質標準法規與室內空氣品質標準等，同時參考美國 US EPA Guidebook 與 AQ-SPEC 所述規範訂定感測器發展規格。

為了將感測器進行微小化，1958 年美國德州儀器公司 (Texas Instruments, TI) 設計積體電路的概念，將具備相移振盪器由鍺 (Ge) 元素製成的電晶體 (transistor)、電阻與電容元件構

成，並由金線連接⁽⁹⁾。Noyce 提出了一種單片積體電路概念，該積體電路設計基於一平面化架構，使用矽 (Si) 元素與鋁導線，並將其共同沉積於具有二氧化矽絕緣層的矽晶圓表面，透過鋁導線的嫁接連接數個不同電路元件⁽¹⁰⁾。

英特爾 (Intel) 創始人 Gordon Moore 在 1965 年提出，積體電路上可容納的電晶體數目，每年會增加一倍論述至 1975 年時修正為隔兩年增加一倍，被稱為「摩爾定律 (Moore's law)」。1970 年代，該公司所推出的第一款積體電路單元，將 2300 個電晶體製作於 12 mm² 基板上。若將一個電晶體類比為一個人，當時積體電路中電晶體的密度概念，就如同一座小型音樂廳擠入滿堂的人潮一般；六十年後的當代，這樣積體電路的概念，已經能將超過 13 億 (1.3 billion) 個電晶體微縮製造於十倍大的基板上 (122 mm²)⁽¹¹⁾。

智慧微塵 (smartdust)，其特色是將具備電腦功能的微型化感測器，由微處理器 (MCU, microcontroller)、通訊與感測材料所組成的微型化元件，具備感測器、讀取電路整合之多功能特色，並可透過網路串接成網域。該項技術 2001 年由美國加州大學柏克萊分校教授 Pister 所提出，如圖 2 所示⁽¹²⁾。利於蒐集資訊，處理資訊，並與其他節點連接形成網路 (network)。目前大多運用於軍事、醫療健康與環境監控。



圖 2. 智慧微塵感測元件架構⁽¹²⁾。

Shi 等人⁽¹³⁾ 發展可植入體內進行生理監控的無線微型裝置，包含可以探測體溫的溫度感測器、超音波感測器等裝置，透過無線供電方式進行感測元件運行，並可傳輸量測資訊，該感測器尺寸小於 0.1 mm³、功耗低於 1 nW，並經由小鼠神經刺激測試感測功能，如圖 3 所示。

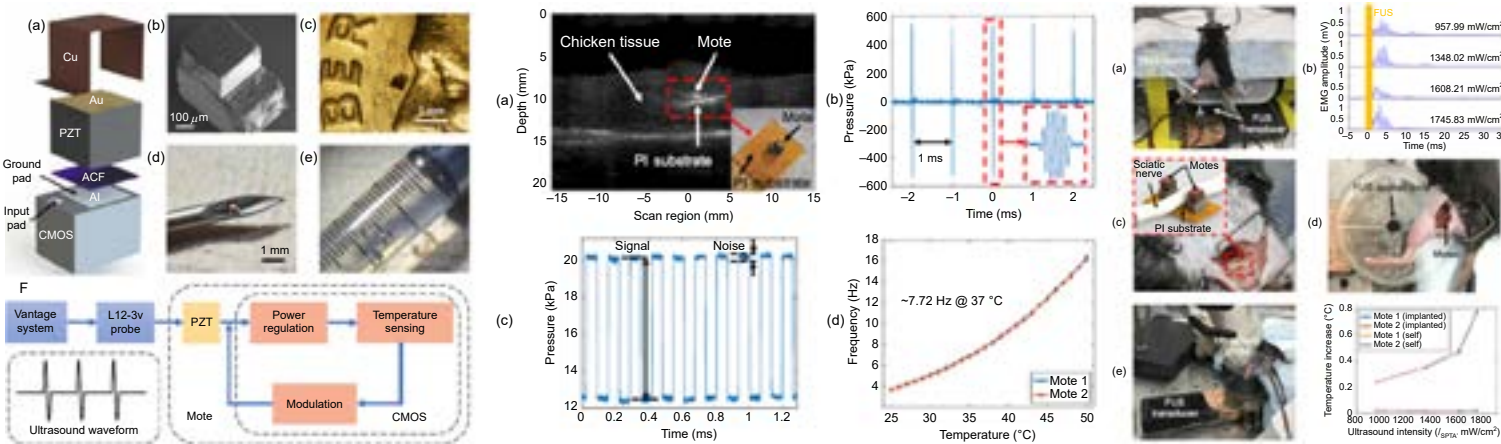


圖 3. 可植入體內進行生理監控的無線微型裝置⁽¹³⁾。

Zhang 等人⁽¹⁴⁾ 提出一種無線、無電池的感測裝置整合之微型無機發光二極體，具備超低功耗，可透過微流體系統傳遞到偵測目標周圍的神經。透過光與藥物間的交互作用進行長時間分析，如圖 4 所示。

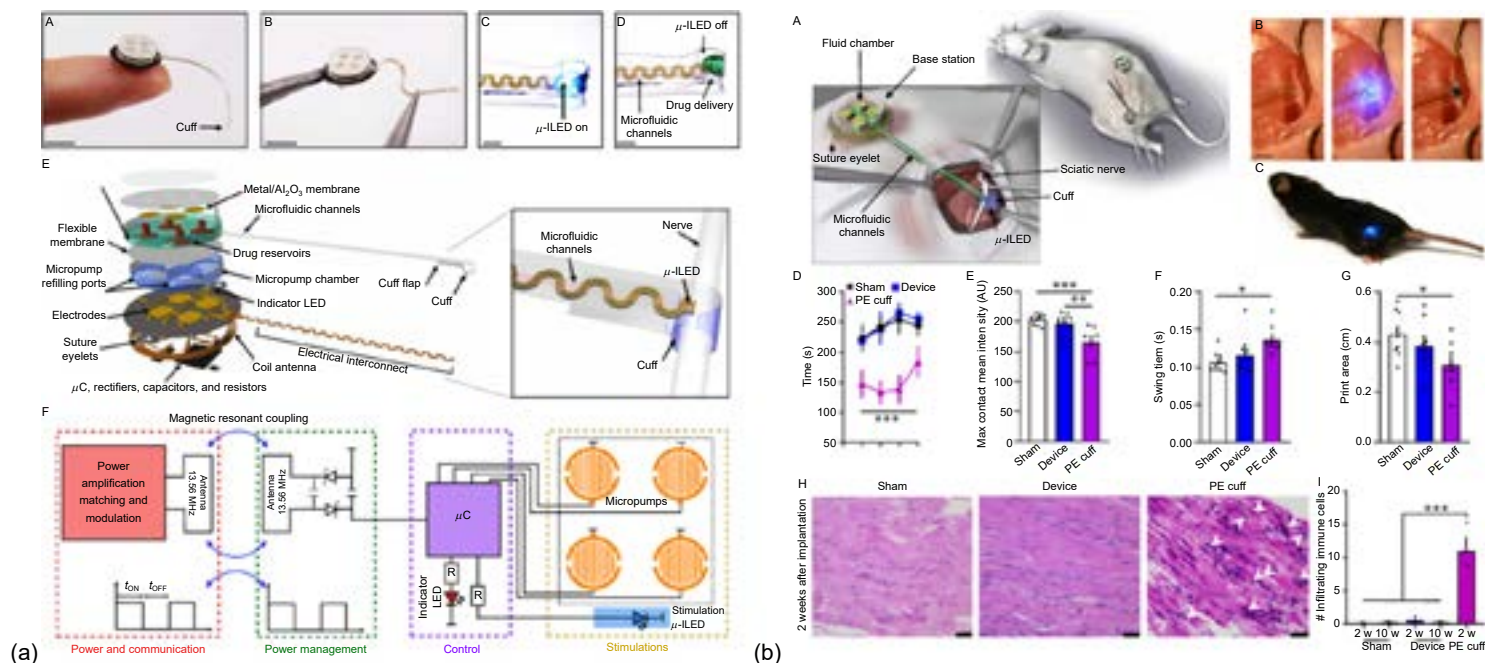


圖 4. (a) 用於可編程藥理學和光遺傳學的無線、無電池神經袖帶、(b) 無電池光流體神經袖帶系統的植入及其對動物行為和神經健康的影響⁽¹⁴⁾。

Inamori 等人⁽¹⁵⁾ 發展了可穿戴的經皮膽紅素計 (圖 5)，整合氧飽和度 (SpO_2) 和心率 (HR) 感應功能，透過新生兒的臨床實驗證明了可能性。通過可穿戴膽紅素計和光療設備的自動鏈接，以優化治療新生兒黃疸。

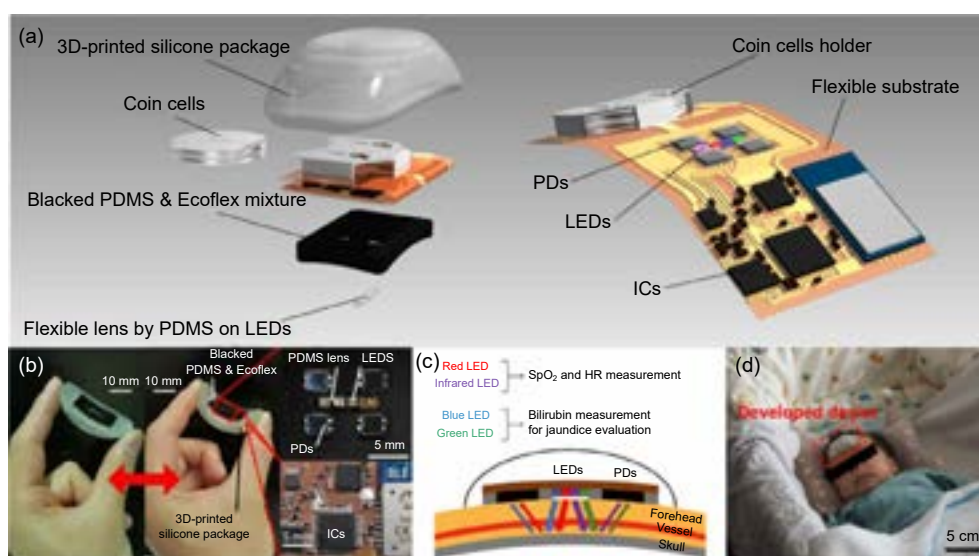


圖 5. 可穿戴膽紅素計實際結構⁽¹⁵⁾。

Han 等人⁽¹⁶⁾ 發展能夠精確、連續測量生理健康柔性皮膚感測器於臨床醫療保健當中，整合可撓式材料、設備設計、無線電力輸送和通信策略，以及類皮膚、無電池傳感器的整體系統架構可用於整個身體的溫度和壓力偵測。應用在臨床睡眠實驗室進行受試者研究 (圖 6)。

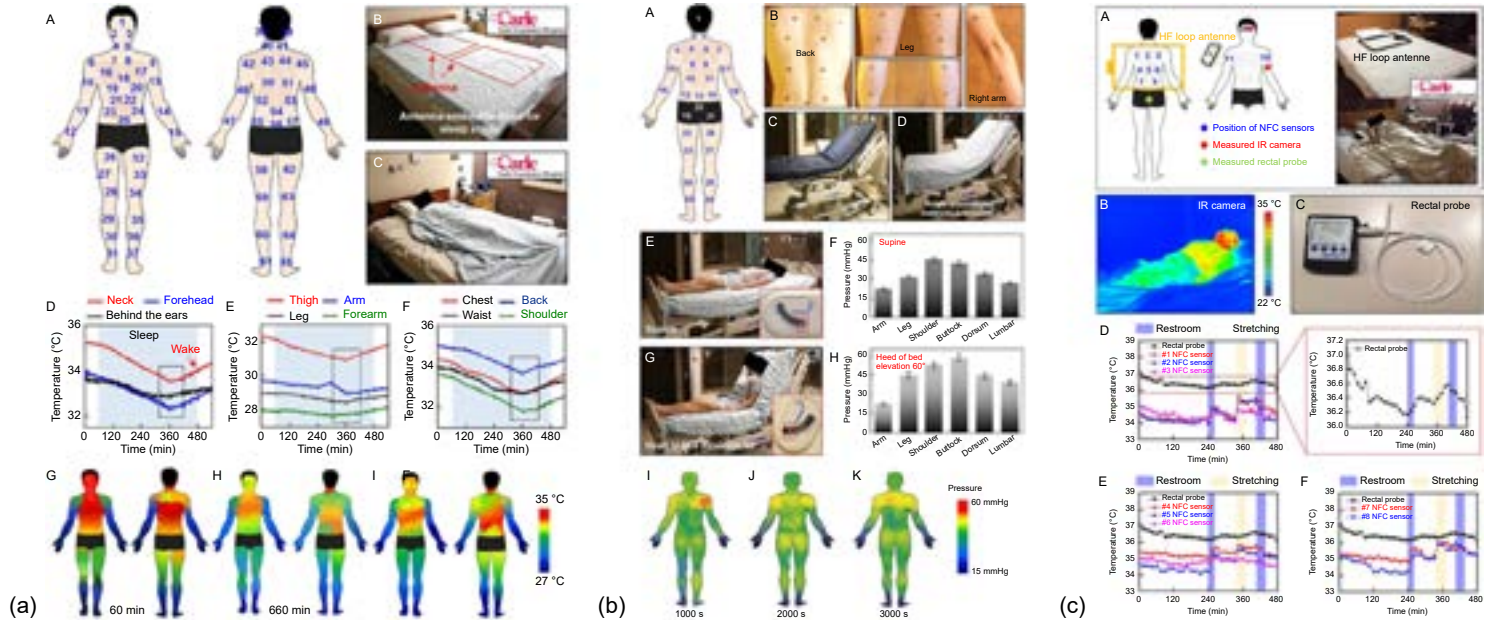


圖 6. 柔性皮膚感測器於臨床醫療應用⁽¹⁶⁾。

自 2015 年起國際大廠盛思銳 (Sensirion)、博世 (Bosch)、奧地利微電子 (AMS) 分別投入整合式氣體感測元件的開發，如：Sensirion (SGP30)、Bosch (BME680)、AMS (AS-MLV-P2, CCS801) 如圖 7 所示。多功能整合晶片 (SoC) 係由下述幾個功能元件，包含：感測材料 (sensing materials) + 電路 (embedded circuit) + 通訊 + 自供電功能所組成，兼具微小化與低功耗特性。

Devices Analyzed - Gas Sensor



圖 7. 氣體感測器國際大廠整合式晶片產品研發。

二、微型化氣體感測器系統架構與訊號讀取電路設計

微型化氣體感測器可以透過半導體製程進行大批量製作，其具有體積小和易封裝整合等特性，預期將逐漸加重氣體感測器市場占有率，因此後段電路整合開發之感測器驅動與訊號讀取系統，其技術發展具備其重要性。微型化氣體感測器系統電路架構，如圖 8 所示，包含：(a) 氣體感測器元件端、(b) 電源供應端、(c) 電子/電路訊號處理端與 (d) 通訊介面端等功能，針對不同應用情境與偵測氣體標的，其感測薄膜材料將有所不同。

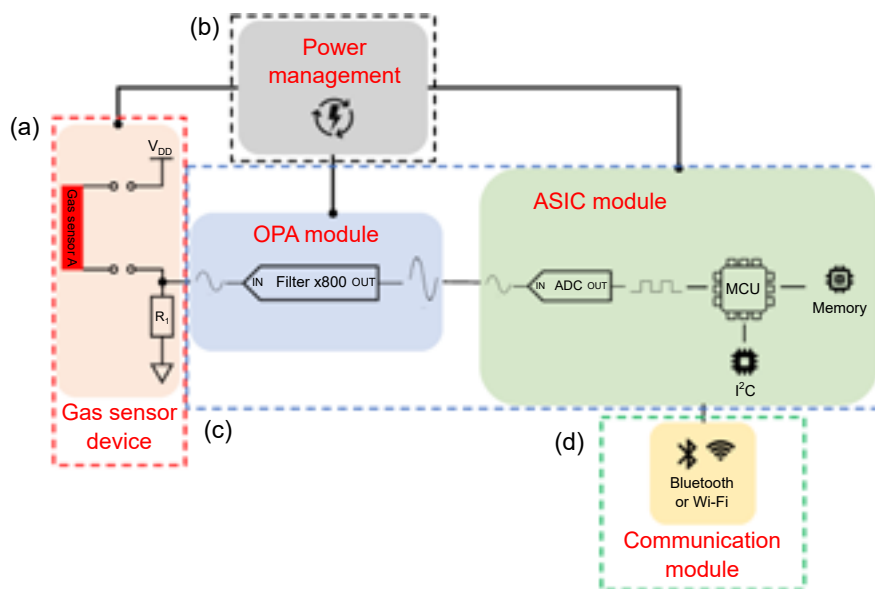


圖 8. 微型化氣體感測器電路架構，包含：(a) 氣體感測器元件端、(b) 電源供應端、(c) 電子／電路訊號處理端及 (d) 通訊介面端。

本文所述之微型化氣體感測器架構適用於民生應用場域 (環境部標準測站、智慧城市應用)、特殊環境場域(汙水處理廠、科學園區測站)與業界場域 (半導體製程場域)，其可偵測之氣體標的如：CO、NO₂、SO₂、O₃、NH₃、H₂S、VOCs 等，多數微型化氣體感測器使用半導體薄膜電阻式感測材料作為與氣體分子反應之介質，本架構以極小化方式進行電路系統設計及佈局，單一電路板面積僅有 17 mm × 17 mm，微型化氣體感測器公板系統電路系統佈局，如圖 9 所示，其腳位功能及規格分述如下：

- [V_{in}]：電壓輸入，輸入範圍為直流電壓 2.8 V–3.6 V。
- [GND]：接地。
- [TX]：資料輸出。
- [RX]：資料接收。
- [溫度與濕度感測元件]：採用 I²C 通訊協定，其濕度誤差值為 1.5 %，溫度誤差值為 0.2 °C。
- [R_i]：標準電阻，耐受性 (tolerance) 0.1%，溫度係數 (temperature coefficient of resistance, TCR) 10 ppm/°C。
- [AI–S]：感測器元件訊號端與讀取電路連接打線區，透過此區域與感測元件端 (Sensor) 連接，其參考電壓 (V_{ref}) 為 1.2 V
- [AI–H]：為感測器元件加熱器 (heater) 端與讀取電路連接打線區，透過電晶體脈衝寬度週期調變 (pulse width modulation, PWM) 比率精準調節加熱元件輸出功率。其所獲得之平均

電壓如方程式 (1) 所示：

$$PWM \text{ duty} = V_{in} \times Duty \quad (1)$$

其中 V_{in} 為輸入電壓 (V)， $Duty$ 為脈衝寬度週期 (%)

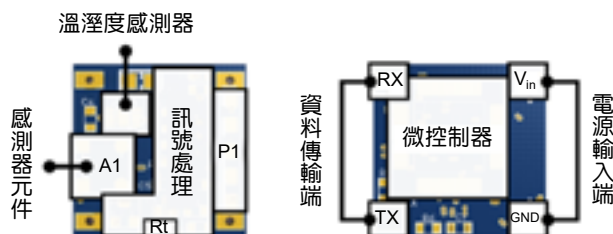


圖 9. 微型化氣體感測器公板系統電路設計及佈局。

三、微型化氣體感測器讀取電路與測試

感測器元件訊號讀取電路架構如圖 10 所示，當氣體感測元件與響應氣體進行反應時，感測元件電阻值變化時即觸發進行訊號擷取三個分壓數據訊號 (ADC1~ADC3)。其中 ADC1 為 MCU 所提供的參考電壓 (V_{ref}) 訊號 1.2 V，ADC2 為氣體感測器電阻值 (R_s) 與標準電阻值 (R_t) 之間的分壓。ADC3 為進入接地端的分壓訊號，藉此可推導出感測元件電阻值即時變化情形，如方程式 (2) 至 (4) 所示。

$$V_{out} = V_{ADC2} = V_{ref} \cdot \frac{R_t}{R_t + R_s} \quad (2)$$

$$R_t = 100 \text{ kohm} \quad (3)$$

$$R_s = V_{ref} \cdot \frac{R_t \cdot (V_{ref} - V_{out})}{V_{out}} \quad (4)$$

其中 R_s 為感測器元件電阻值 (ohm)， R_t 為標準電阻值 (ohm)， V_{out} 為感測器元件電阻值 (R_s) 與標準電阻值 (R_t) 之間的分壓。

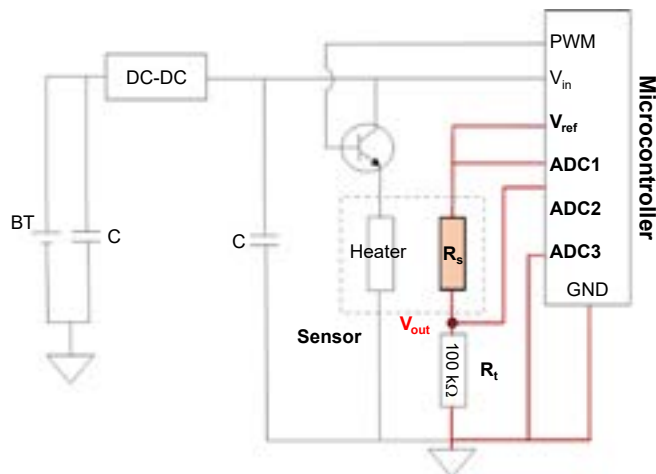


圖 10. 感測器元件訊號讀取電路架構圖。

經由擷取三個分壓數據訊號後導入微控制器 (MCU) 進行 r 減法放大器及後端運算處理，進行瞬間雜訊突波抑制。進而推算原有純淨訊號，藉以達成數位濾波，如圖 11 所示。

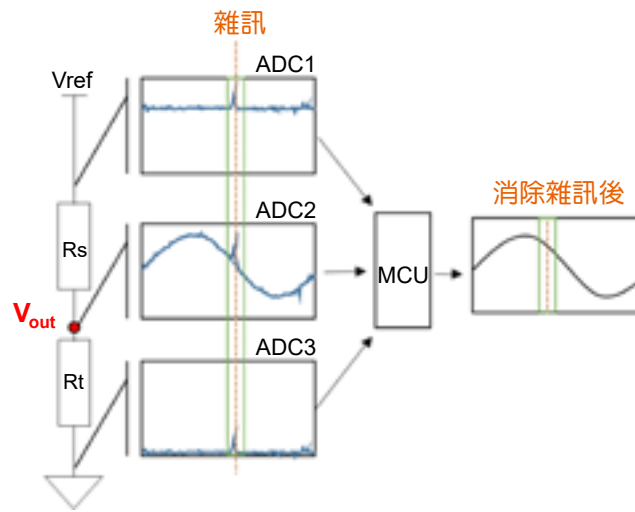


圖 11. 感測器擷取功能電路架構圖。

系統依據 MCU 韌體設定取樣時間進行資料輸出，定時以 ASCII 格式輸出連續字元組合，透過預先設定解析格式將字元進行逐步解析，經解析後所獲得的感測器電阻值即為量測訊號，最後將測得之電阻值帶入不同的氣體濃度響應方程式與溫度、濕度感測器之讀值進行參數校正後即可進行感測器氣體濃度變化曲線繪製。

透過具備高精度與低溫度飄移係數的標準電阻 (R_t) 與感測元件 (R_s) 進行分壓，藉以實際獲得感測元件電阻值。因此，當感測元件在不同的初始電阻值區間將有 1% 至 3% 不等的偵測誤差。本研究係以標準電阻接入感測元件端進行驗證，模擬感測元件電阻值從 100 ohm 至 16,700,000 ohm 之區間進行連續切換與偵測數據之擷取與記錄所量測的電阻值誤差範圍。最終彙整成電阻值與誤差範圍區間數據資料，如圖 12 所示。經測試後本公板系統讀取誤差 $< \pm 1\%$ 之感測元件電阻值適用範圍介於 1,000 ohm 至 5,000,000 ohm，超出其範圍者其誤差值越大 (如：16,000,000 ohm，誤差 $< 3\%$)。考量感測元件功耗、氣體濃度偵測範圍與偵測精準度，本系統建議適用於感測元件電阻值區間為 1,000 ohm 至 5,000,000 ohm 偵測範圍。然而較大的電阻值區間範圍 (如 5,000,000 ohm 至 16,700,000 ohm) 雖可進行量測，但其量測誤差將隨之提高，而需進行誤差補償。

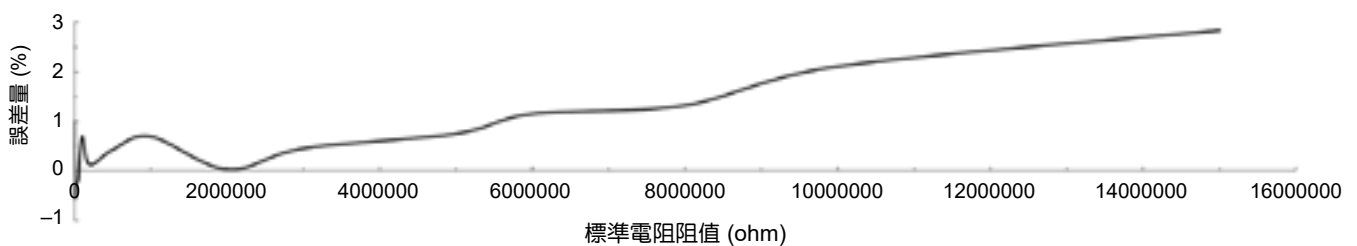


圖 12. 感測器系統標準電阻誤差實測結果。

微型化氣體感測器公板系統可提供學研界感測元件開發與後續商品化介接，透過本系統感測元件 (感測端與加熱端) 與公板進行黏合，即可提供氣體感測元件加熱控制與感測電阻值擷取，透過後端軟體進行電訊號與氣體濃度變化轉換，可在不同應用情境下進行數據蒐集與分析。

由於微型化氣體感測器公板系統體積僅有骰子般大小 ($17 \times 17 \times 17 \text{ mm}^3$)，如圖 13 所示。搭配微型鋰電池，通訊方式使用藍牙 5.1，平均可使用超過兩小時。無線通訊與加熱器整體功耗範圍約 10 mW，因此可透過有線方式進行電力供應，或搭載小型太陽能板進行長時間持續運作，以利達成低成本且廣泛佈點目標。

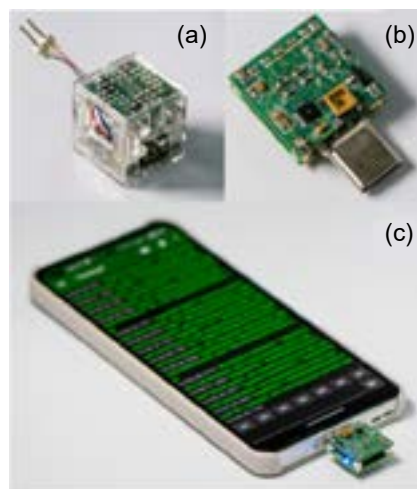


圖 13. 微型化氣體感測器公板系統。

四、結論

物聯網時代隨之而來的是 AI 浪潮技術高速發展，提供此龐大系統運作的最基礎單元即為感測器元件，可預測於未來提供單一的 AI 成熟系統進行訓練與運作，所需的感測器數量需達百萬，因此如何使感測器系統得以微小化、高可靠度、高協作性與低成本，如同摩天大樓的地基，直接影響整體系統的基礎是否穩固，透過建立微型感測器讀取系統，可以將大量的感測器設置於生活中的每個角落，雖然其微小到容易忽略其存在，但透過網路系統互相連結，緊密的協同合作，無時無刻的替人民警戒著環境的各種突發危害，於生活中守護你我的健康與安全。

誌謝

本研究承蒙國家科學及技術委員會經費補助 (計畫編號 NSTC 110-2218-E-492 -005-MBK、111-2218-E-492-008-MBK、112-2218-E-492-006-MBK、113-2218-E-492-001-MBK)，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. Sales Revenue in the Cellular IoT Market to Register a Stellar CAGR During 2026 - 2026. Persistence Market Research, January 23 (2019).

2. Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, Marimuthu Palaniswami, *Future Generation Computer Systems*, **29** (7), 1645 (2013).
3. Please refer to the website: <https://technews.tw/2018/08/27/gartner-2018-hype-cycle-for-emerging-technologies/>
4. Please refer to the website:
<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/>
5. Please refer to the website:
<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-drive-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020/>
6. Please refer to the website: <http://www.ctimes.com.tw/>
7. Please refer to the website: <http://www.mem.com.tw/>
8. Please refer to the website: <http://big5.china.com/>
9. J. Kilby, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **23**, 648 (1976).
10. C.H. Museum, <https://go.nature.com/2wF9Q1r>, (2018).
11. 林彥甫, 二維電子元件的發展可否成為下一世代的希望?!, 物理雙月刊, (2019)。
12. B. A. Warneke, K. S.J. Pister, "An Ultra-Low Energy Microcontroller for Smart Dust Wireless Sensor Networks," *2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, February 15-19, 316 (2004)
13. Chen Shi, Victoria Andino-Pavlovsky, Stephen A. Lee, Tiago Costa, Jeffrey Elloian, Elisa E. Konofagou, Kenneth L. Shepard, *Science Advances*, **7** (19), eabf6312 (2021).
14. Yi Zhang et al., *Science Advances*, **5** (7), eaaw5296 (2019).
15. Go Inamori et al., *Science Advances*, **7** (10), eabe3793 (2021).
16. Seungyong Han et al., *Science Translational Medicine*, **10** (435), eaan4950 (2018).

作者簡介

林奕成先生為國立虎尾科技大學飛機工程學系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理研究員。

Yi-Cheng Lin received his M.S. in Department of Aeronautical Engineering from National Formosa University. He is currently an Assistant Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蔡淑如為美國馬里蘭大學學院市分校材料工程與科學系博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Shu-Ju Tsai received her Ph. D. in Department of Materials Science and Engineering from University of Maryland, College Park. She is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳柔甄小姐為南台科技大學電子工程系碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理研究員。

Rou-Jhen Chen received her M.S. in Department of Electronic Engineering from National Formosa University. She is currently a research assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

蕭文澤先生為國立彰化師範大學機電工程所博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Wen-Tse Hsiao received his Ph.D. in Mechatronics Engineering from National Changhua University of Education. He is currently a Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳峰志先生為國立成功大學機械工程博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員兼副主任。

Fong-Zhi Chen received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a Researcher and Deputy Director General at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

高光譜應用於農業與水域的檢測

Hyperspectral Sensing in Agriculture and Water Areas

李龍正、申雍

Long-Jeng Lee, Yuan Shen

由於高光譜影像符合工業 4.0 精神，高光譜影像本身就是大數據，研究人員可憑藉這些光譜影像數據分析達成精準量測、預測，乃至於施作管理。本文以高光譜影像應用在精準農業及水域環境觀測為例，闡述高光譜在生態環境應用。

Since hyperspectral images are in line with the spirit of Industry 4.0, hyperspectral images themselves are big information of data. Researchers can rely on the analysis of these spectral image data to achieve accurate measurement, prediction, and even implementation management. In this article, we take the application of hyperspectral imaging in precision agriculture and water environment observation as examples to illustrate the application of hyperspectral in the ecological environment.

一、前言

依據 2010 文獻⁽¹⁾ 指出，2007 年水污染參數化學氧氣需求量 COD (chemical oxygen demand) 中，由居民及商業行為造成佔 35%，由農業造成佔 42%，可見環境保護及水污染管控，在農業管理及輔導工作非常重要。於 2013 年，德國提出「工業 4.0」的構想與概念，奠立智慧儀控在工業化中的重要作用。於 2015 年「農業 4.0」也被提出，國內也有農業醫生(專家) 這個計畫，利用網路和影像，進行農業施作諮詢，所以有學者提議將「工業 4.0」應用到農業領域，落實農業 4.0 一些政策內容。如圖 1，工業 4.0 利用網路儀控及大數據分析體現智慧儀控，智慧施作及智慧管理。利用網路儀控讓儀器自動化自我管理及施作，利用模擬軟體模擬施作過程，減少施作錯誤且智慧施工可縮短工時，利用儀控自我管理數據及施作狀況，運算大數據分析，以提供更有效智慧管理模式。在精準農業領域很早就有上述的構想基礎，但利用感測器運用於農業施作，於近年逐漸被重視。如高光譜影像應用於精準農業，可預估農作物健康狀態及病蟲害，利用影像中光譜訊息推估農作物含氮量及病蟲害，進而推估農作產量及對農業施作進行改善。



圖 1. 利用高光譜影像為平台，將工業 4.0 理念延伸至精準農業。

在國家科技預算及國家實驗研究院台灣儀科技研究中心（以下簡稱儀科中心）經費支持下，我們也針對沿海地層下陷和其影響沿海濕地關係探討，認為利用濕地生態植被研究，可反推地層下陷危機。另外和學校研究團隊合作精準農業和水質應用，利用紅外線-Red edge 及植被指數—常態化差異植生指標 (normalized difference vegetation index, NDVI) 反推植被健康狀態。在水域水質監控，則利用水庫水面葉綠素在高光譜影像呈現，推估水質分佈。於 2014 年和成功大學合作之水下高光譜儀進行臺澳國際合作計畫，於澳洲電視台播放臺澳雙方合作在海草生長之研究，彰顯國人利用科技合作能量能進行國際外交。

二、農業檢測應用

植物吸收紅光及藍光，然於近紅外光譜區有很好反射率，另外常態化差異植生指標通常是利用衛星遙感光譜影像數據計算，以評估目標地區綠色植被的生長狀況。常態化差異植生指標是一個數值指標，在地面上可用於植物水果成熟度或病害程度鑑別。常態化差異植生指標的計算是利用紅光與近紅外光的反射強度，能顯示出植物生長、生態系的活力與生產力等資訊，數值愈大表示植物生長愈好。常態化差異植生指標的計算方式如下方程式所描述：

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (1)$$

其中， R_{NIR} 為近紅外光的反射率， R_{Red} 為紅光的反射率，常態化差異植生指標之值介於 -1 到 1 之間，當紅光的反射為零時，有最大值 1；反之，當近紅外光的反射為零時，有最小值 -1。

以上參數是以常用常態化差異植生指標影像做演繹，並不一定適用於大豆病蟲害，一些國際研究文獻有整理 30 幾項光譜參數供作分析，在與實際植病進行比對，最具線性結果才是最佳光譜參數，在農業施作可選取幾項作比對，以解算速度最佳為優先考量。以下就整理所得列表如表 1 分項說明。

高光譜數據光譜範圍 400—1000 nm，常見上百個波段，研究人員可以上述數據運算推估植作氮含量，植作發育狀況，最佳採收期及預估產量，這些數據搭配老農經驗就可整理出量化的生產及管理模式，如果不如預期，就選擇其它農作，譬如有些田地土壤層太少，下方都是石頭，若種水稻，水和肥料無法有效吸收，排到石頭區，污染水域，且稻作產量低，建議改旱作。國內中興大學從事精準農業研究⁽²⁻⁴⁾，以高光譜或多光譜配合水稻成長觀測，如圖 2，不同時期拍攝高光譜，評估水稻含氮量，並推估預期產量。

表 1. 農作光譜指 標 應用各項檢測應用。

比值	$R(800)/R(550)$, $R(750)/R(550)$, $R(695)/R(420)$	發育狀態，病蟲害
比值	$R(800)/R(1660)$, $R(1660)/R(550)$, $R(900)/R(970)$	水傷指數，水含量
比值	$R(800)/R(635)$ 葉綠素含量, $R(800)/R(500)$ 胡蘿蔔素含量	
比值	$R(515)/R(570)$, $R(515)/R(570)$, $R(520)/R(500)$	胡蘿蔔素指數
比值	$R(750)/R(710)$	紅位移指數，發育進度
正規比	$(R(800)-R(670))/(R(800)+R(670))$	NDVI
正規比	$(R(700)-R(670)-0.2*(R(700)-R(550)))/(R(700)/R(670))$	葉綠素吸收指數
正規比	$(R(755)-R(444))/(R(755)+R(444))$	含水量指數素
正規比	$(R(515)-R(531))/(R(515)+R(531))$	光合作用指數

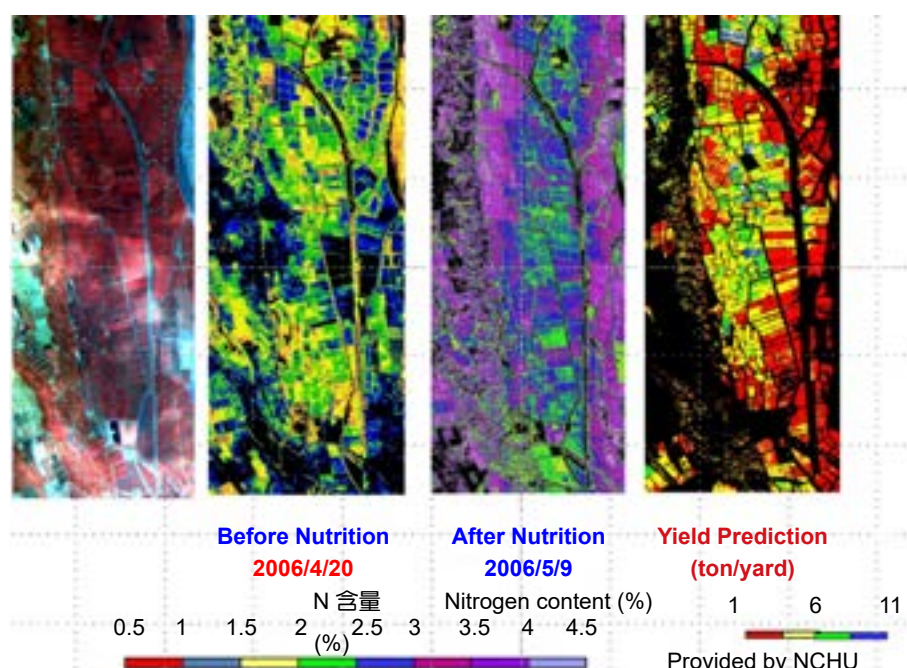


圖 2. 高光譜在水稻不同成長時期拍攝，依光譜參數推估植作含氮量，並推估產量。

三、水域檢測應用

在儀科中心數年對高光譜在水域方向研究可分成：1. 水庫水質、2. 濕地保育、3. 水下環境監測。

1. 水庫水質

水中水質可由水中葉綠素 A 得知，而水面葉綠素 A 可由高光譜影像估算⁽⁵⁾：

$$\text{葉綠素 A} = a * (705/675 \text{ nm}) - b, \text{ 其中 } a \text{ 及 } b \text{ 為地真資料線性回歸數據} \quad (2)$$

$$\text{濁度 NTU} = a * (710 - 740 \text{ nm}) - b, \text{ 其中 } a \text{ 及 } b \text{ 為地真資料線性回歸數據} \quad (3)$$

水庫水質關係民生用水，濁度提昇不僅縮短水庫壽命，且影響水質，所以濁度污染源觀

察極為重要，常用濁度單位為 NTU (nephelometric turbidity unit)，從圖 3 觀看濁度來源，一為進水口，另一為大埔垃圾掩埋場。

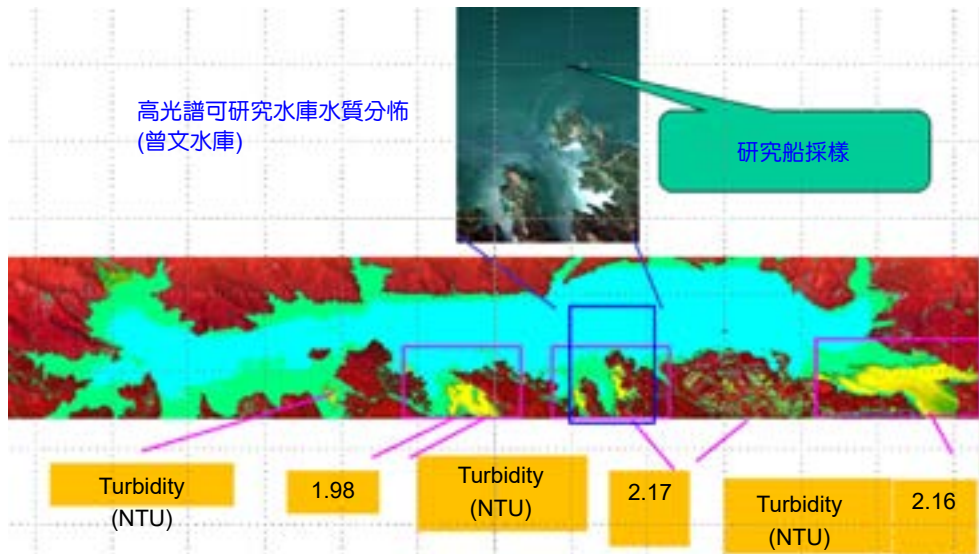


圖 3. 利用高光譜影像推估水庫水域濁度。

2. 濕地保育

濕地保育是研究碳匯，也是研究地層下陷之重要課題。碳匯是透過植物光合作用並利用呼吸行為，濕地中的生態系得以和大氣進行碳的交換。濕地維管束植物和非維管束植物 (如藻類)，進行光合作用吸收空氣中二氧化碳，將碳保存在濕地底層分解速率之最低土壤中，濕地能將碳貯存起來，這有助於空氣碳量減少進而緩和全球暖化的速度。然臺灣沿海濕地保育不易，一是由於超抽地下水，地層下陷，鹽份不斷侵損濕地，另一是農業施用農藥，造成一些動物及微生物死亡，間接影響植物生存。於 2006 年筆者從台中港沿著海岸航拍高光譜至六輕，高光譜影像如圖 4⁽⁶⁾，除了芳苑濕地在大排灌注淡水，植物成長健康，其餘周遭作物皆呈現亞健康，其餘海岸植作很少。濕地除了吸收碳外，還可吸收廢水污染物和農作氮肥及磷肥。濕地植作之紅位移光譜，除了記錄植作健康外，尚可觀察地層下陷及鹽份侵入狀況。

3. 水下環境監測

利用高光譜進行水下環境觀測可分為國內珊瑚觀測及澳洲水草觀測。水下高光譜在水下拍攝，需須有穩定航行載具，國研院海洋中心依魷魚在水下行動仿製滑行載具如圖 5⁽⁷⁾。

自 1940－2000 年，南澳阿德雷德附近海域海草消失超過 50 平方公里⁽⁸⁾，南澳政府及研究人員認為是由於居民在海上活動及經濟環境對海域污染所造成，依研究人員 Seddon (2002) 認為水的濁度不利海草光合作用。於 2014 年，國立成功大學、國研院儀科中心及澳洲自來水公司獲得澳州政府補助，利用水下高光譜進行海域海草研究如圖 8，本次研究主要利用光譜訊息探知影響海草生長之未知因素。

如圖 9 所示，儘管我們的高光譜儀設計在 400－800 nm 進行了優化，但我們發現存在一



圖 4. 沿海高光譜航拍及經濟部水利署嚴重地層下陷區域。



圖 5. 水下高光譜載具依魴魚仿制而成。

定量 400 nm 以下的紫外線，特別是在海底的沙子處。可能是紫外線對海底的海洋生物造成傷害，導致魚類和海草之間的營養圈消失，海草向海底更深處移動，這是本次研究新發現，事實上最近研究人員已在離海更遠更深及發現了海草⁽⁹⁾。

四、結論

高光譜影像是含空間訊息和光譜訊息，是研究生態系之一把利器。於本文中介紹了儀科中心對精準農業及水域監測的研究工作，包括精準農業之各項關鍵光譜指標，水下高光譜訊息除了在可見光外，未來可提昇到紫外光區，了解水下植物在微許紫外光產生高價值營養。另外在碳匯研究，盤點固碳植物，減緩全球暖化時程的研究上，高光譜影像也極具應用潛力。

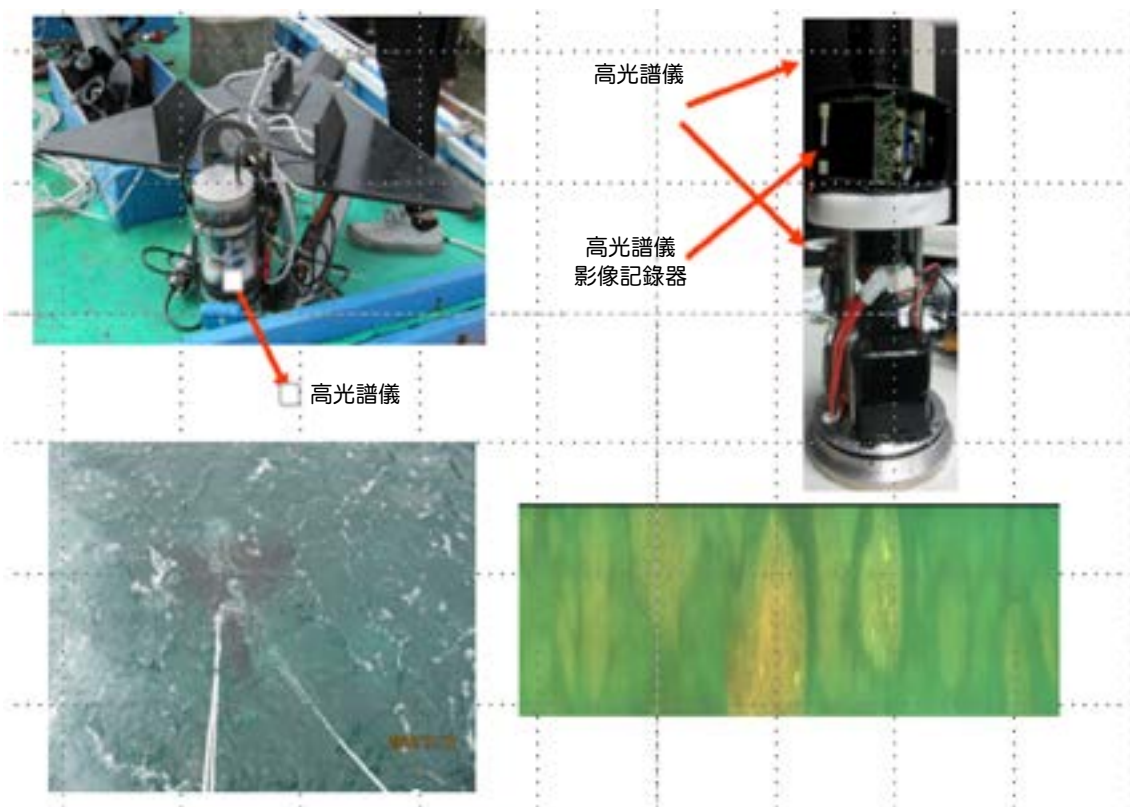


圖 6. 水下高光譜組立 3D 圖與航行及岩岸拍攝高光譜影像圖。

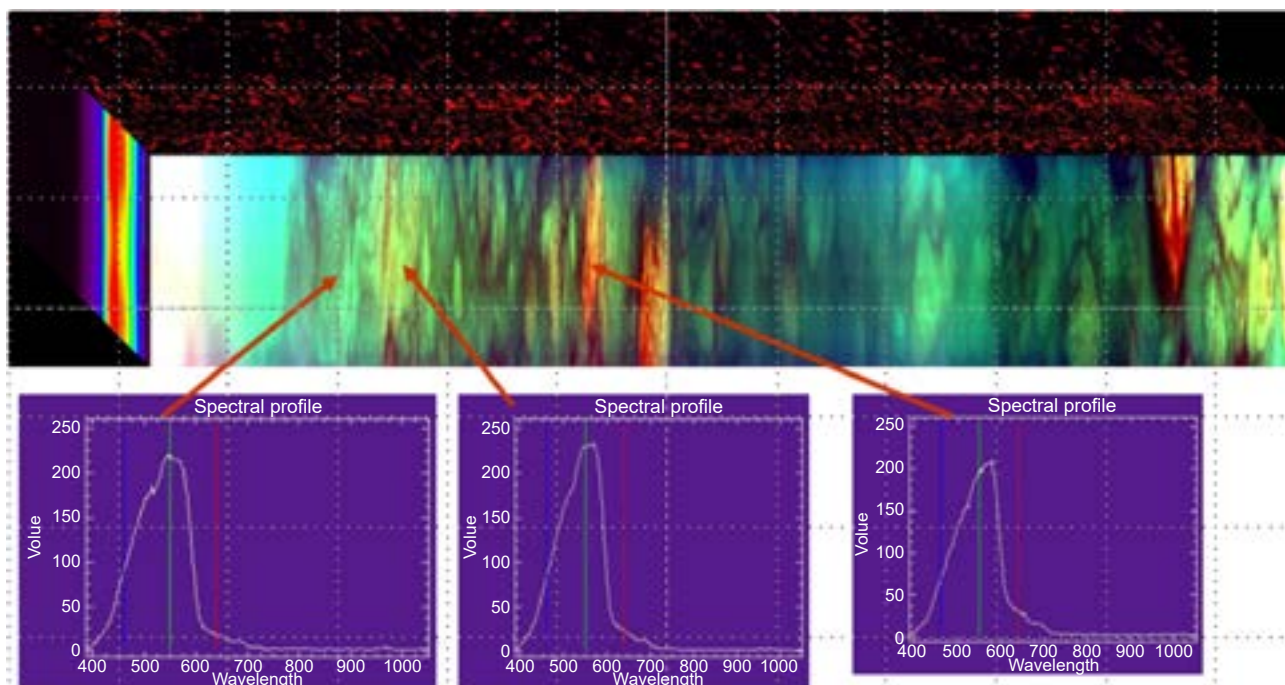


圖 7. 岩岸拍攝高光譜影像光譜 3D 圖。



圖 8. 水下高光譜儀在水下 20 公尺拍攝高光譜影像及澳洲媒體報導。

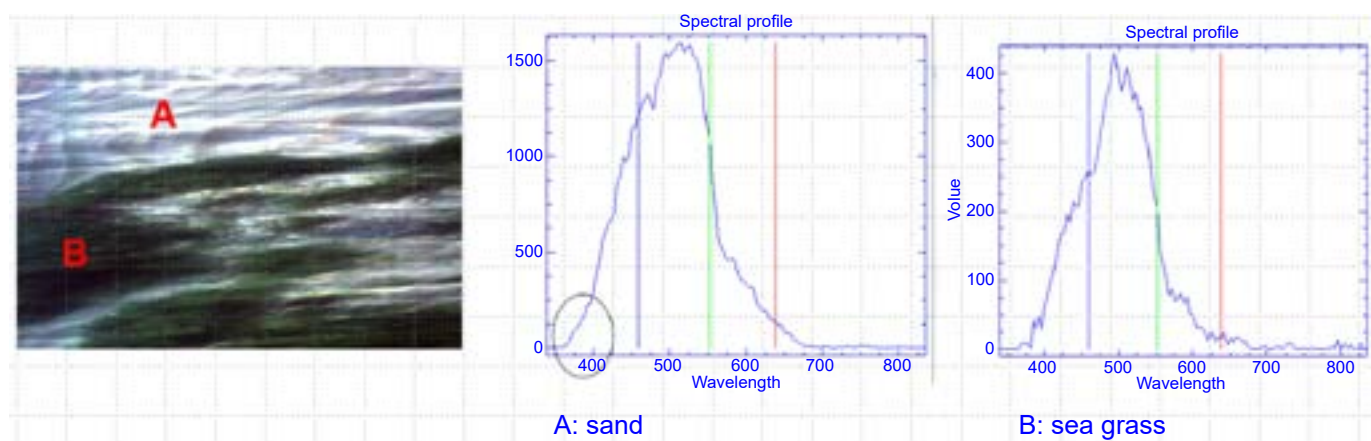


圖 9. 海草及沙地高光譜資料，特別在 400 nm 以下之光譜值。

參考文獻

1. "Communique on First Pollution Census" February 6, (2010).
2. 王淑姿, 吳振記, 申雍, 高光譜影像儀在精準農業之應用研究, 科儀新知, **29** (3): 22 (2007).
3. 王淑姿, 陳守泓, 姚銘輝, 申雍, 應用高光譜影像探討水稻產量與生育性狀空間變異之研究, 2007 數位地球研討會論文集, (2007).
4. Wang, S.Z., C.C. Wu, Y. Shen, "Detection of nitrogen over fertilization by hyperspectral imager and its applications", International Symposium of Sustainable Water and Soil Environment. Taichung, Taiwan, 137-144 (2008)

5. Naseer A. Shafique, Florence Fulk, Bradley C. Autrey, Joseph Flotemersch, *Environmental Science*, 216 (2003)
6. Long-Jeng Lee, Jen-Yu Wen, Shenq-Tsong Chang, Cheng-Fang Ho, Ting-Ming Hung, “Airborne Test of Hyperspectral Imager and Study on the Wetland along the Coast”, *The 4th Taipei International Conference on Digital Earth*, May 25, (2006).
7. Long-Jeng Lee, Chih-Hua Chang, Sheng-Wei Huang, Wen-Chang Yang, Cheng- Chien Liu, “The Preliminary Test of Hyperspectral imager for Under water Monitor and Its Studied on the Coral Reef”, *International Symposium on Remote Sensing (ISRS)*, April Busan, Korea, (2014).
8. Seddon S. 2002. “Issues for seagrass rehabilitation along the Adelaide metropolitan coast: An overview”, in: Seddon S. and Murray-Jones S. Eds. *Proceedings of the seagrass restoration workshop for Gulf St Vincent 15-16 May 2001*. Department of Environment and Heritage and SARDI Aquatic Sciences, Adelaide, pp. 1-8.
9. Long-Jeng Lee, Charnsmorn Hwang, Chih-Hua Chang, Michael Burch and Milena Fernandes, “The study of UV Effect on the Seagrass by Underwater Hyperspectral Image”, *International Symposium on Remote Sensing (ISRS)*, May 17~19, Nagoya, Japan, (2017).

作者簡介

李龍正先生為國立清華大學化學博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員。

Long-Jeng Lee received his Ph.D. in Chemistry from National Tsing Hua University. He is currently a Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

申雍先生為美國威斯康辛大學土壤博士。

Yuan Shen received his Ph.D. in Soil Science from the University of Wisconsin-Madison, USA.

鋰電池防爆預警檢測之研究

Research on Lithium Battery Explosion-proof Early Warning Detection

宜千鈺、王聖璋、蕭育仁

Qian-Yu Yi, Sheng-Chang Wang, Yu-Jen Hsiao

隨著鋰電池在全球市場的需求增長，其安全性問題成為關注焦點，特別是在電動車及儲能系統中的應用。為了應對鋰電池因過充、短路等引起的熱失控，本文探討了溫度及氣體感測器等多種安全監控技術，監測電池內部及周圍環境變化，降低鋰電池運行過程中的風險，延長其使用壽命與提升效能。研究表明，多元感測技術具有較高靈敏度與可靠性，適用於電動車與儲能系統等領域，為鋰電池市場的可持續發展提供了強有力的技術支持與安全保障。

As the demand for lithium batteries in the global market grows, safety concerns have become a focal point, especially in applications such as electric vehicles and energy storage systems. To address the issue of thermal runaway caused by overcharging, short circuits, and other factors, this paper explores various safety monitoring technologies, including temperature and gas sensors, to monitor changes inside and around the battery, thereby reducing operational risks, extending battery lifespan, and enhancing performance. The study indicates that multi-sensor technology offers high sensitivity and reliability, making it suitable for applications in electric vehicles and energy storage systems, thus providing strong technical support and safety assurance for the sustainable development of the lithium battery market.

一、全球市場規模

根據 Market Data Forecast 以及 Intellect Markets 的數據分析，在 2023 年鋰電池市場規模已達到約 684 億美元。隨著電動汽車 (electric vehicle, EV) 需求和可再生能源儲能系統 (energy storage system, ESS) 的發展，市場預估在 2024 將達到 779.8 億美元，並於 2029 年突破至 1501.4 億美元，期間的複合年增長率 (compound annual growth rate, CAGR) 大約為 14%⁽¹⁾。這一增長與各國政策的推動密不可分，例如歐盟計劃在 2030 年至 2035 年實現電動車全面取代傳統燃油車，市場轉向電動汽車和燃料電池車 (FCV)，而這一目標的達成將大幅拉動鋰電池市場需求⁽²⁾。

二、鋰電池的基本結構與技術特性

鋰電池是一種利用鋰金屬或鋰合金作為陽極材料的電池，並使用非水性電解質溶液進行電化學反應。和一次性使用的鋰原電池不同的是，鋰離子電池具備可反覆充電的優勢。

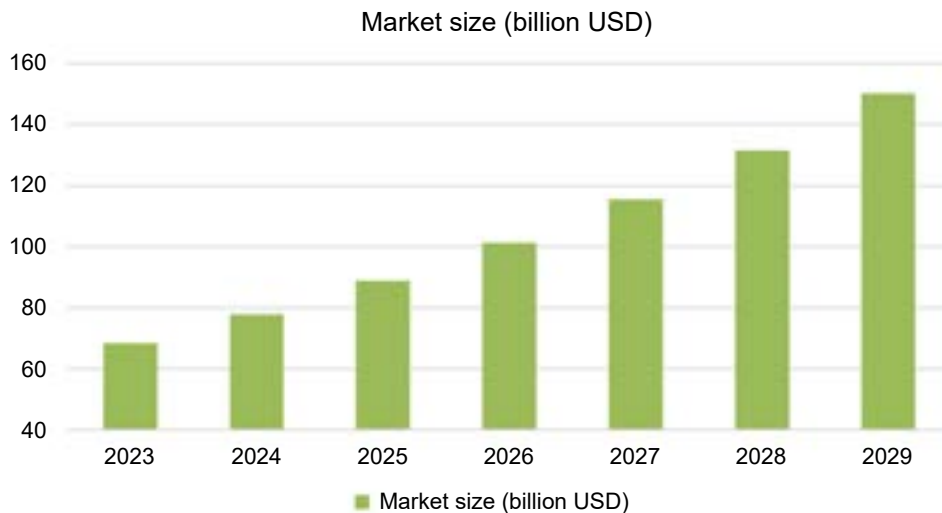


圖 1. CAGR 為 14% 預測之數據圖。

鋰電池的最大優勢在於其高能量密度，即在單位重量下能存儲更多的能量。與傳統鎳鎘電池或鉛酸電池相比，鋰電池不僅能量密度更高，而且具有更小的體積與更輕的重量。因此，它能夠在較小的空間中提供長時間續航，這使其成為便攜設備首選。此外，鋰電池具備較低的自放電率與無記憶效應，意味著即使不頻繁使用，電池仍能保留大部分電量；並且可以隨時充電，不需要等到完全放電後再充電，這大大提高了電池的使用壽命和便利性。

這項特性使其在現代科技中扮演了至關重要的角色，尤其在可重複充電的設備上，如手機、電動車及各種消費電子產品中應用廣泛。

三、現況與挑戰

電池爆炸是一個高度危險的事件，可能帶來嚴重後果，包括火災、人身傷害和財產損失，如圖 2⁽³⁻⁴⁾ 所示。造成爆炸的原因十分複雜，涉及過充電、過放電、短路、高溫 and 材料缺陷等多方面因素，這些因素相互作用，使得防止電池爆炸變得更加困難。



圖 2. 鋰電池爆炸 (圖／取自網路)⁽³⁻⁴⁾。

隨著科技的發展，鋰硫電池和固態電池等新型電池技術不斷涌現，為現有電池技術的改進帶來了新的機會。然而，這些技術同時也面臨一些挑戰，例如鋰硫電池可能因硫化物的堆積導致內阻增加⁽⁵⁾，而固態電池的結構變化可能會引發內部應力，從而增加爆炸的風險⁽⁶⁾。

表 1. 有關於鋰電池爆炸事件及原因。

事件名稱	發生時間	爆炸原因
Boeing 787 Dreamliner 電池起火事件	2013	輔助動力裝置 (APU) 電池過度充電致使電池過熱電解液漏出，導致電池短路 ^(7, 8)
Samsung Galaxy Note 7 爆炸事件	2016	電池內部設計缺陷，使正負極容易接觸，造成內部短路，從而引發過熱、爆炸 ⁽⁷⁾
Tesla Model S 電池起火事件	2019	電池內部短路、過度充電引發熱失控
韓國電動車自燃事件	2024	電池過度充電以及設計不良，導致電池自燃

四、電池爆炸原因及影響

隨著電池在現代科技中的廣泛應用，其潛在的安全問題越發受到重視，尤其是電池爆炸風險。鋰電池的熱失控 (thermal runaway) 是一個複雜且危險的現象，其常見的誘因包括過充、物理損壞以及暴露於高溫環境中。當電池過充時，電極材料可能發生副反應，導致內部電壓異常升高，並促使電解液分解，產生氧氣 (O_2) 和氫氣 (H_2)。這些氣體會增加電池內部壓力，最終導致膨脹、漏液甚至爆炸。此外，物理損壞 (如碰撞或穿刺) 會破壞隔膜結構，導致正負極之間發生直接接觸，引發短路，進一步導致過熱，並增加燃燒或爆炸的風險。若鋰電池暴露於高溫環境中，內部反應速度會加快，熱量無法及時散逸，最終導致內部材料分解、燃燒，甚至引發熱失控的連鎖反應。

當鋰電池處於不正常使用或極端條件下，這些因素往往會相互影響，加劇內部反應失控，產生急劇升溫。這種情況下，若無法及時進行檢測和干預，電池可能進入不可逆的熱失控，迅速產生大量能量，嚴重威脅設備和周圍環境的安全。

為防範此類風險，採用各種感測技術 (如溫度、氣體感測器等) 來進行實時監控，成為提升電池安全性的重要策略。這些感測器可以即時偵測到異常情況並發出預警，有效降低爆炸風險，進而提升鋰電池使用安全性與可靠性。

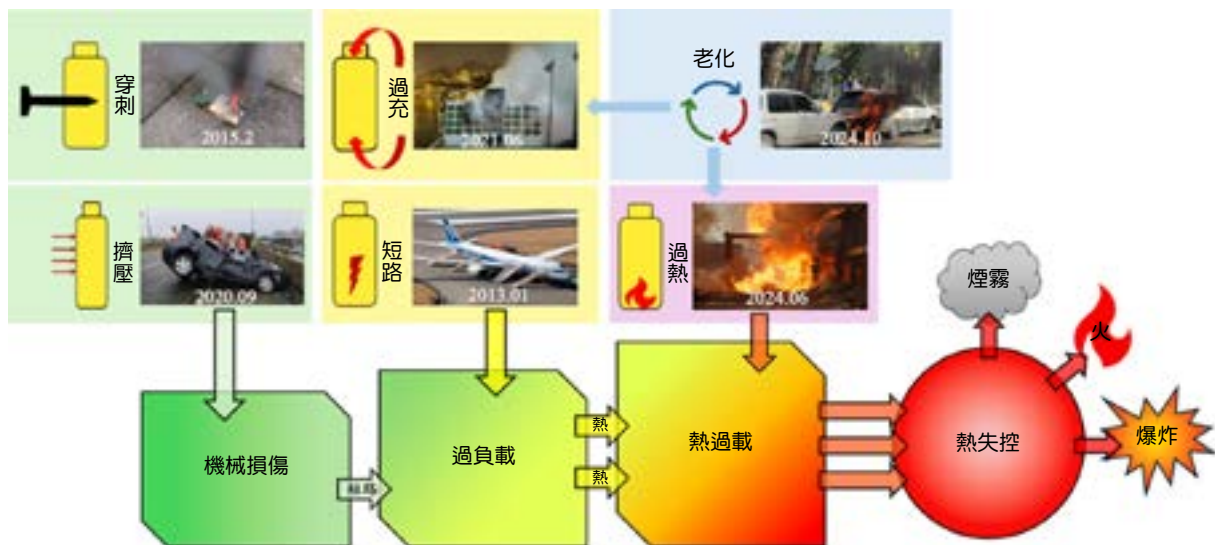


圖 3. 電池爆炸原因。

4.1. 溫度對電池的影響

高溫對鋰電池有很大的影響，尤其是當溫度超過攝氏 60 至 70 度時。此時，鋰電池內部的化學反應加速，導致內部壓力升高，這不僅會加速電池老化和容量下降，電池內部化學反應的變化，還可能增加過熱、起火或爆炸的風險，如圖 4 所示。長期處於高溫環境下，鋰電池的壽命會縮短，甚至可能造成無法修復的損壞。

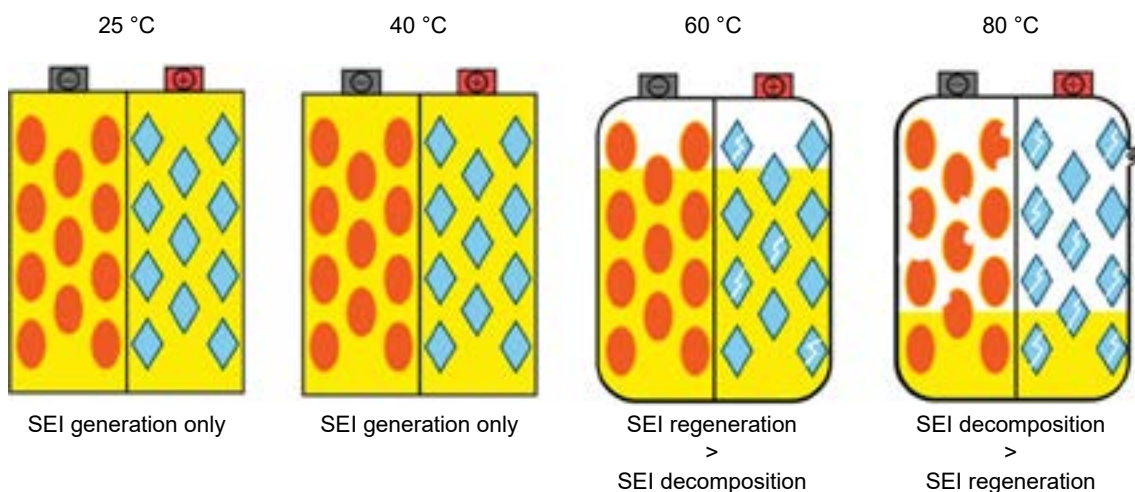


圖 4. 溫度對電池的影響示意圖。

4.2. 電池爆炸釋放之氣體

鋰離子電池的故障可能由多種因素引起，例如製造缺陷、過熱、電力使用不當或物理損壞。在某些情況下，這些故障會引發電池內部的放熱反應，導致溫度上升並產生氣體。當這些氣體積聚在電池內部時，最終可能導致電池破裂，並釋放氣體⁽¹⁰⁾。在電池爆炸發生前，電池系統通常會釋放出多種氣體，這些氣體的種類和濃度可能預示著爆炸的風險。圖 5 為電池在不同狀態下釋放的各種氣體成分。

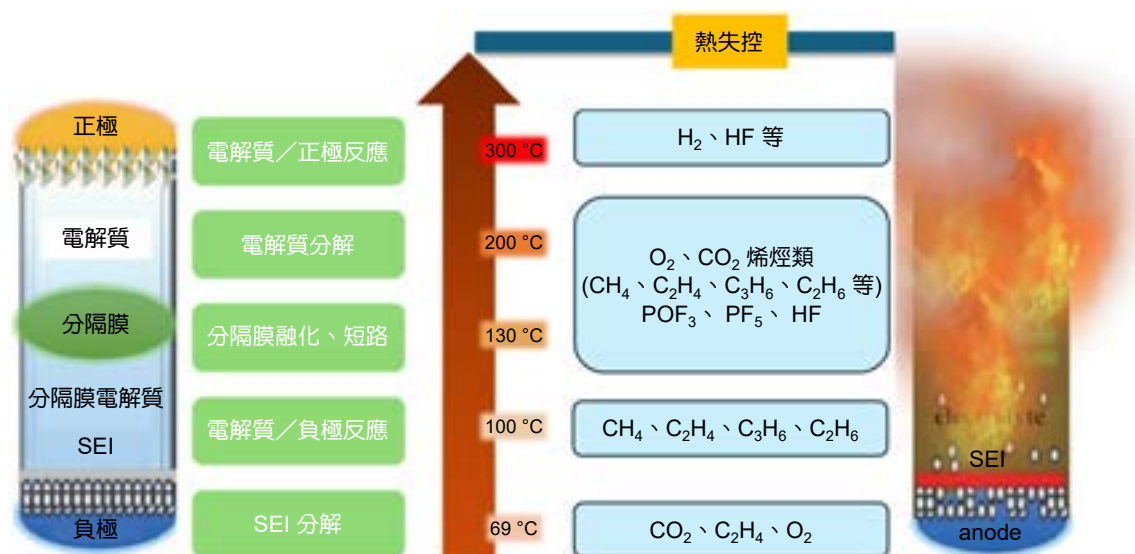
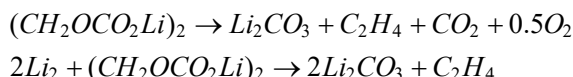


圖 5. 電池升溫產生氣體對應圖。

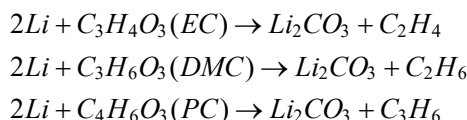
鋰電池過度充電時，負極可能出現鋰飽和，導致多餘的鋰離子在負極表面析出⁽¹¹⁾，形成鋰枝晶。這些鋰枝晶與 PVDF (鋰電池中的黏著劑) 反應，釋放出氫氣 (H₂)⁽¹²⁾。鋰枝晶的成長會刺穿隔膜，造成微短路，進而釋放能量產生一氧化碳 (CO)，



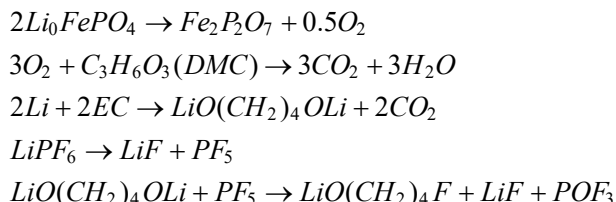
隨著電池內部溫度升高，鋰電池的固態電解質界面膜 (SEI 膜) 開始分解，生成乙烯 (C₂H₄) 和其他氣體⁽¹³⁾，



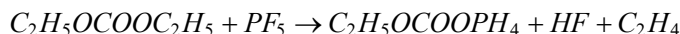
SEI 膜分解釋放出大量的熱，這進一步導致電解液與負極反應，生成丙烯 (C₃H₆)，



當電池溫度超過 130 °C，正負極之間的隔膜融化，導致短路範圍擴大，溫度迅速升高。這進一步觸發電解液與鋰發生反應，生成五氟化磷 (PF₅) 和三氟氧磷 (POF₃)，這些都是具腐蝕性的氣體，



當電池內部溫度超過 200 °C，電解液發生自分解反應，生成氟化氫 (HF) 等有害物質，這意味著電池進入熱失控的階段，可能隨時發生爆炸。



在電池爆炸的早期階段，主要釋放的氣體成分是一氧化碳 (CO)、氫氣 (H₂) 和乙烯 (C₂H₄)

五、探討與比較偵測方法

我們需要不斷深入研究電池的材料、結構及運作機制，而偵測方式主要集中於監測電池內部狀態及其周圍環境條件，以提前預警潛在的危險。

以下是幾種常見的鋰電池爆炸偵測方式：

5.1 溫度監測

熱電偶溫度計是由兩種不同材質的金屬 A 和 B 組成，如圖 6 所示，當它們焊接在一起形成一個閉合迴路，並在兩端產生溫差時，會產生電流，導致電壓改變，這就是所謂的熱電勢。溫差越大，電流和電壓變化也越大，根據這個電壓變化，我們可以計算出溫度。熱電偶實際上是一種能量轉換裝置，能將熱能轉換成電能。溫度高的一端叫做工作端，溫度低的一端稱為參比端。這種感測器基於熱電效應，當兩端有溫差時，會產生電壓，反過來，施加電壓也會產生溫差。這個效應可以用來發電、測溫、冷卻或加熱，並且能根據施加的電壓來控制溫度。

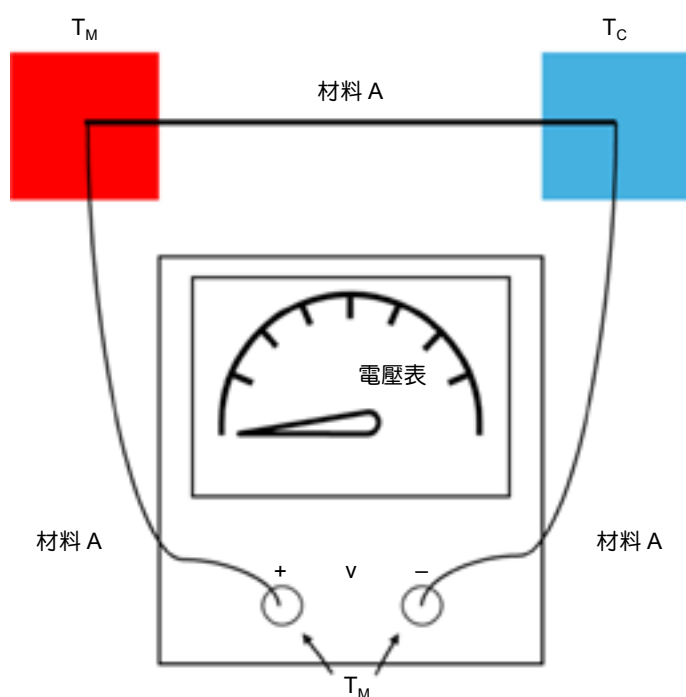


圖 6. 熱電偶測溫原理圖。

根據 Shuang 等人的研究結果⁽¹⁴⁾，感測器的正常運行溫度範圍為 23.4°C 至 32.9°C 。在這個範圍內，感測器能即時記錄溫度上升速率，並將數據與氣體濃度的資訊一同上傳至雲端。通過對比氣體濃度與溫度數據，可以判斷電池是否存在異常情況。

當溫度超過 32.9°C 時，鋰離子會析出並形成鋰枝晶，導致電池電壓迅速上升。而若溫度突破 50°C ，則表示電解質已與鋰離子反應，標誌著電池正式進入熱失控狀態。

5.2 氣體感測器

目前，在鋰電池熱失控監測技術中常用的氣體感測器包括電阻式氣體感測器、催化燃燒式感測器、紅外吸收感測器、石英晶體微量天平 (quartz crystal microbalance, QCM) 感測器等。根據 Cai 等人⁽¹⁵⁾ 提出一種基於氣體感測技術的鋰電池熱失控早期偵測方法，透過監測熱失控早期釋放的 CO_2 濃度進行預警。研究表明，氣體感測器的反應速度比傳統的表面溫度感測器更快，在熱失控擴散之前能有效偵測到信號。其中，電阻式氣體感測器因為其高靈敏度、穩定性以及易於整合的特性，展現出良好的應用前景，成為電池安全監控的重要工具⁽¹⁵⁻¹⁷⁾。

我們利用鋰電池異常早期釋放的有機揮發性氣體 (volatile organic compounds, VOC) 作為氣體感測器的主要偵測對象，如圖 7，隨著不同濃度的氣體施加，感測器的電阻值會發生變化，根據這一原理，可以有效偵測鋰電池的異常狀況。

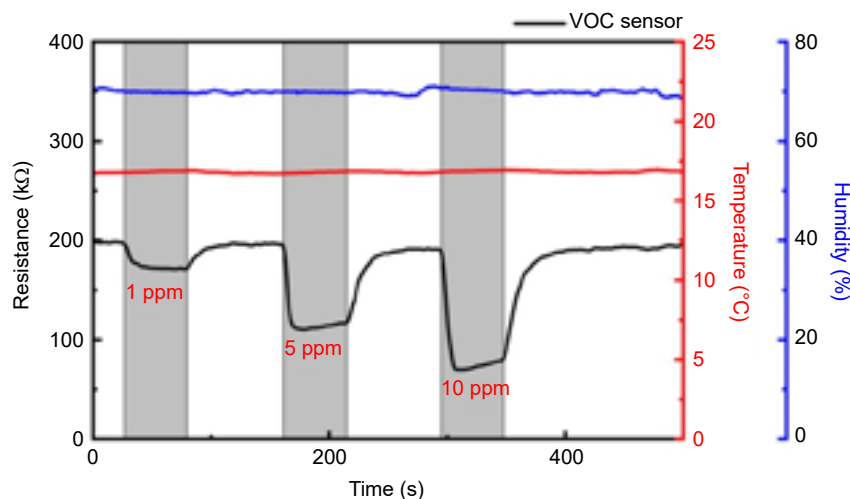


圖 7. 氣體感測器所量測之室內濕度、溫度以及電阻值與氣體濃度。

5.3 電化學監測

鋰電池的電化學監測主要透過測量電壓、電流、溫度、內阻和氣體排放等參數，來分析電池在充放電過程中的狀態變化，並評估電池的健康狀態 (state of health, SOH) 和電量狀態 (state of charge, SOC)。這些數據能提供關於電池性能的關鍵信息，有助於預測潛在的故障風險。此外，結合電化學阻抗光譜 (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) 和循環伏安法 (cyclic voltammetry, CV) 等技術，能深入解析鋰電池內部的電荷傳輸和反應動力學，這對於評估性能及分析老化機制非常重要。這些監測技術對提升鋰電池安全性和延長使用壽命具有重要作用。

在 Schmidt 等人的研究⁽¹⁸⁾ 中，他們利用 EIS 技術測量鋰電池內部溫度，並測試了不同溫度分布情況。在實驗結果的數據可見，抗阻測量能準確反映電池的平均內部溫度，說明選擇適當的頻率可實現精確的溫度測量。此外，數據表明在高頻下，抗阻與溫度的關係更加穩定，且 SOC 的影響也較小，這代表在未知 SOC 的情況下，高頻測量具有明顯的優勢。

5.4 電池外殼形變感測與機械損傷檢測

電池安全性是鋰電池應用中關鍵的考量，監測技術的應用有助於提早發現潛在風險。電池外殼形變感測技術利用感測器監控鋰電池外殼的變形，藉此推測內部狀態變化，如氣體洩漏或熱失控。當內部壓力增加時，會引起外殼形變。常見的感測裝置包括應變計、壓力感測器或光纖布拉格光柵 (fiber Bragg grating, FBG) 感測器，這些裝置能精確監測外殼形變並預測潛在風險，進而提高電池安全性。Huang 的研究⁽¹⁹⁾ 將改良的 FBG 感測器嵌入鋰電池石墨電極層中，用以長期監測應變與溫度，並結合微型壓力計評估電池的電量狀態與健康狀態。

除了外殼形變監測，機械損傷檢測技術則是透過偵測外部機械應力對電池結構的影響來防止事故發生。機械損傷檢測針對電池在跌落、穿刺、碰撞等情況下的結構損傷，旨在評估外力對電池完整性的影響，防止因物理損傷引發內部短路或其他危險。這項技術能及早偵測

異常並立即發出警報，從而預防潛在災害。湯元會等人的研究⁽²⁰⁾中，評估了鋰離子電池在遭遇尖銳物體擠壓（如汽車碰撞）時的安全性，尤其是在針刺條件下的表現。通過實驗，他們探討了荷電狀態、針刺速度、針刺深度和針刺位置對電池熱失控的影響。結果顯示，鋰離子電池在針刺失效後有一段反應時間，不會立即發生熱失控，且當荷電狀態越高、針刺深度越深時，電池越容易發生熱失控，其劇烈程度與這些參數成正相關。

5.5 電池壽命預測和建模

電池管理系統 (battery management system, BMS) 可做為一種電池壽命預測與建模的一種形式，BMS 在電動車中扮演著關鍵角色，能有效管理電池的能量及健康狀態。它可持續監控電壓、電流和溫度等電池參數，準確的 SOC 和 SOH 估算能有效減少熱失控風險並延長電池壽命⁽²¹⁾。模型基礎的演算法，如擴展卡爾曼濾波器 (extended Kalman filter, EKF)⁽²²⁾，被廣泛應用於 SOC 的估算中，且隨著模型複雜度的增加，估算準確度也有所提升。另一方面，SOH 的估算著重於電池內阻和容量衰減情況的分析，確保電池在使用過程中的安全性和穩定性。

而在 Plett 等人的研究⁽²²⁾，他們開發基於 EKF 的算法估算電池的 SOC，並隨著電池的老化自動適應電池特性變化。實驗過程中比較了真實電池電壓變化與擴展卡爾曼濾波器 (EKF) 的電壓變化，顯示出雖然初始估計存在偏差，但 EKF 在幾次運算後迅速收斂，精確估計了電池狀態。也有透過繪製協方差值發現隨著時間推移，EKF 逐漸減少不確定性，顯示算法能持續修正誤差。而在他們的電壓感測器誤差和電壓估計誤差圖中，說明了 EKF 在面對電流和電壓感測器誤差時的表現，即使誤差較大，EKF 仍能準確估算電池狀態，根據這個研究，清楚展現了 EKF 算法在電池 SOC 及其他參數估算上的準確性與穩健性。

5.6 多元感測模組

在光學檢測與氣體感測的結合實驗中，我們選用了 4200 nm 波長的固定紅外線發光二極體 (IR LED) 作為檢測光源，因為 CO₂ 作為惰性氣體，對此波長具有穩定的吸收效應。在 CO₂ 氣體檢測中，我們使用此固定波長的 IR LED，搭配黑氧化鋅熱電堆感測器元件，並結合密閉式鋁合金氣體流道，提供光源照射及待檢氣體的穩定流動環境 (如圖 8(a) 所示)。透過固定波長的 IR LED 發射穩定光源，黑氧化鋅熱電堆感測器將吸收的光能轉化為熱電訊號。當氣體通過流道的進氣端和出氣口時，CO₂ 氣體會對固定光源進行吸收，導致熱電堆感測器的熱電訊號隨檢測氣體濃度的變化而減少。訊號放大器進一步處理感測器輸出的微弱電壓訊號，放大並降低輸出電壓的干擾，以提升量測的精度和穩定性。控制和資料處理模組則由基於 CC265 核心的系統與 PC 組成，用於訊號的解析和處理。

在實驗過程中，我們將測試室的溫度保持在 25 °C ± 0.2 °C，並注入不同濃度的空氣與 CO₂ 混合物，如圖 8(b) 所示。CO₂ 濃度從 500 ppm 開始，每次增加 500 ppm，直到達到 2500 ppm。在圖 8(c) 中，我們展示了感測器電壓訊號的變化，可以觀察到感測器在氣體注入後約 40 秒達到穩定狀態，這樣的實驗可以幫助我們建立一個即時、精準的監測系統，用來偵測鋰電池在運行過程中的安全狀態，並預防潛在的風險。

我們在對含有十六種不同成分的陣列式氣體感測器安置在透明壓克力氣室中，用於收集氣體感測數據以及建立氣感資料庫，如圖 9(a-c)。進行主成分分析 (PCA) 後，繪製了 PCA 圖，如圖 9(d) 所示。這些測試涵蓋了四種目標氣體 (H₂、CO、C₂H₄、HF)，在 PCA 分析中，我們能夠確定每個感測器在判別目標氣體方面的適用性。透過 PCA 圖中的數據分佈，

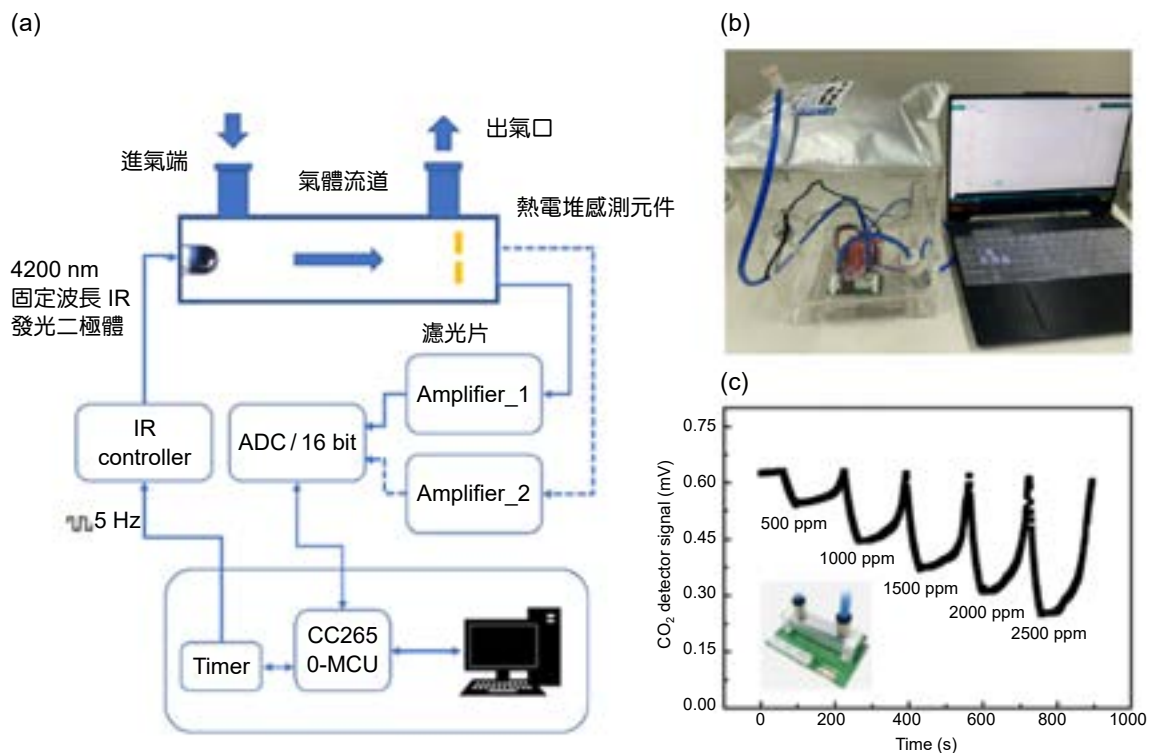


圖 8. (a) CO₂ 熱電堆氣體感測器系統結構圖、(b) 於壓克力腔體實驗、(c) 感測器在不同濃度的電壓變化。

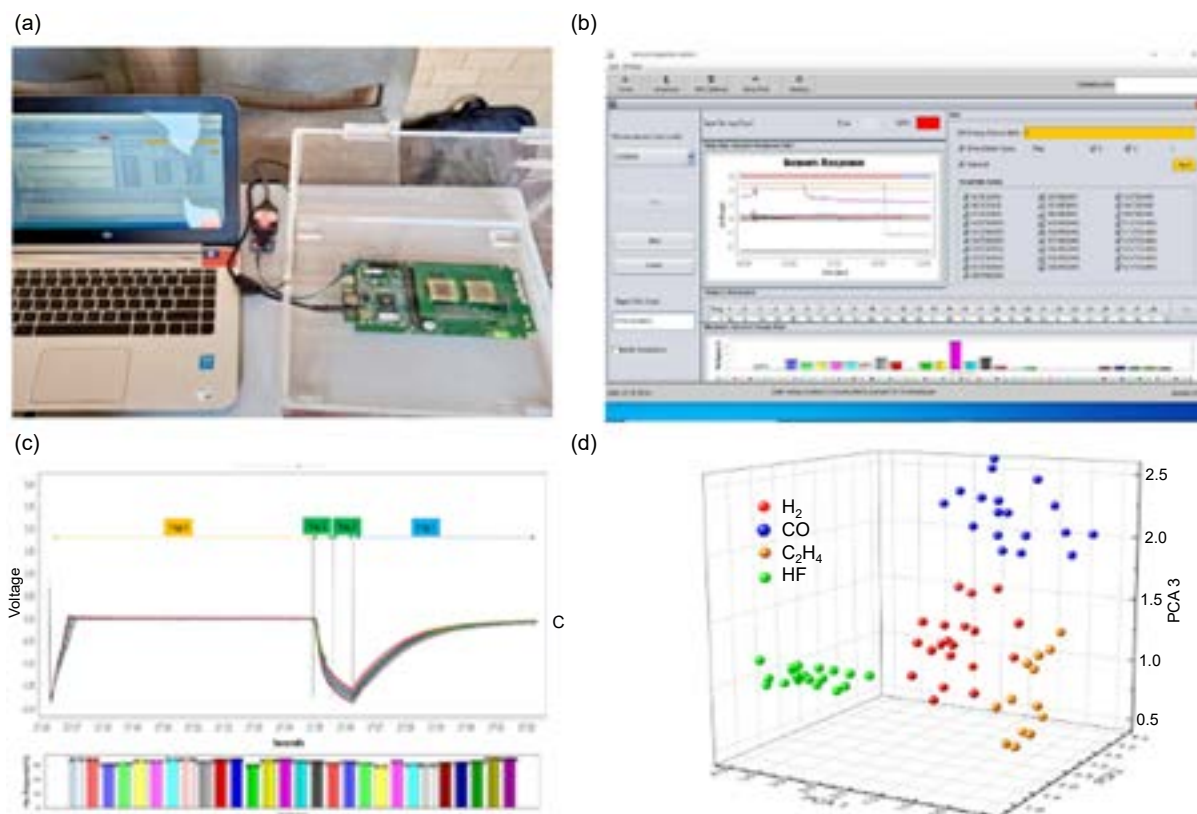


圖 9. (a) 實際測試配置、(b) 氣體感測數據收集和分析、(c) 氣體感測反應電壓圖、(d) PCA 分佈示意圖。

可以識別出哪些感測器最適合用於識別特定的目標氣體，從而為後續的氣體檢測和應用提供依據。多種氣體感測器加上 PCA 的數據處理，可以進一步結合機器學習模型，進行模型辨識和異常檢測。

而 Wenger 等人⁽²³⁾ 還設計了一種基於微機電系統 (microelectromechanical system, MEMS) 金屬氧化半導體 (MOS) 的氣體感測器，在實驗結果顯示了氣體感測器讀數急速下降，電池終端電壓開始上升，預示著電池已經釋放大量氣體，到熱失控開始的時間差只差距了 40 秒。這代表該感測器能夠在熱失控前發出警告，為緊急關閉電池系統提供了一定的時間，從而防止更嚴重的後果，如電池起火或爆炸。

根據 Koch 等人的研究⁽¹⁷⁾，他們在電池模組上結合了電壓、氣體、煙霧、蠕變距離、溫度、壓力、力感測器，進行三次的熱失控測試，如圖 10⁽¹⁷⁾，實驗結果表明每個感測器都有其挑戰與缺點，如表 2⁽¹⁷⁾，所以沒有明確的單一首選應用於熱失控當中，而兩個或多個感測器的組合，可以組成一個檢測系統，互相抵銷彼此的缺點，而電池的壽命穩定性、診斷能力、成本等則取決於電池設計和系統配置。

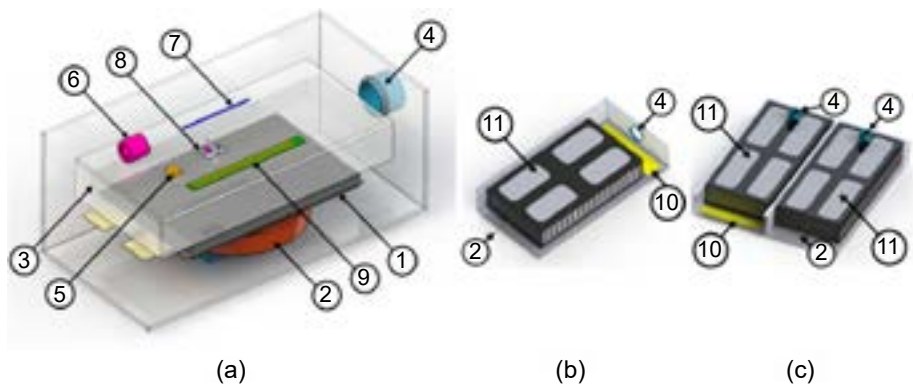


圖 10. 測試中三種不同配置⁽¹⁷⁾，(a) 第一次測試 (b) 第二次測試 (c) 第三次測試，外殼僅露出部分 (1) 電池 (11) 電池模組。(2) 加熱板／釘子、(3) 填充塊、(4) 通風口、(5) 壓力感測器、(6) 氣體感測器、(7) 溫度感測器、(8) 煙霧感測器、(9) 蠕變距離感測器、(10) 有感測器的區域⁽¹⁷⁾。

表 2. 不同感測器在三種類型的評估⁽¹⁷⁾。其中可行性為感測器佈署的難易度。(－) 為差、(0) 為中立、(＋) 為良好。

感測器種類	檢測速度	信號清晰度	可行性
電壓	－	＋	＋
氣體	＋	＋	－
煙霧	－	0	0
蠕變距離	－	－	＋
溫度	0	0	0
壓力	＋	－	＋
力	＋	－	0

上述研究皆是透過多個感測器整合成一個模組，鋰電池的熱失控是一個迅速且難以控制的過程，一旦出現熱失控，電池內部溫度會迅速上升，並可能導致內部壓力增加、氣體釋放、結構變形等多種現象產生，因此整合感測系統能同步偵測多個參數，並將數據即時傳送至中央處理器進行分析。而且在實際環境中會有多中因素影響感測器的精度，像是汽車移動時的氣流導致氣體感測器無法偵測、環境溫度導致溫度感測器失真等因素，而透過結合多種感測器 (如氣體、壓力感測器) 的交叉驗證，能夠有效減少環境因素對於單一感測器的干擾，降低誤報的可能性，並且提升整體監控的可靠性。

表 3 比較了多種鋰電池預警偵測方法，包括溫度監測、氣體感測器、電化學監測以及外殼形變監測。各方法適用於不同需求，選擇時可根據具體應用場景來決定最佳的偵測手段。

表 3. 比較各種鋰電池預警偵測方法的研究做法、優缺點以及其限制。

偵測方法	研究做法	優點	缺點與限制	參考文獻
溫度檢測	使用熱電偶監測溫度	反應速度快，技術成熟	只能偵測溫度，易受環境影響	(14)
單一氣體感測器	監測 CO ₂ 或乙烯等 一氣體	靈敏度高，適合早期異常	只能檢測單一氣體資訊有限	(15)
外殼形變監測	使用壓力感測器監測外殼變形	可偵測內部壓力變化，適合結構損壞預測	無法直接偵測熱失控產生之氣體與溫度變化	(19)
壽命預測與建模	使用 BMS 與 EKF 演算法估算電池壽命	能長期準確估測電池健康和壽命	反應慢，僅適用於長期監測	(22)
複合式感測模組	結合多種感測器進行綜合監測	能監測多參數，快速偵測多元異常	配置複雜，成本較高	(23)
熱電堆與陣列式氣體感測器	使用紅外 LED+ 熱電堆和陣列式氣體感測器	高靈敏度，能即時偵測多種氣體和溫度變化	易受環境因素影響可透過交叉驗證減少干擾	(25)

六、結論

鋰電池在現代能源系統中的應用越來越廣泛，但性能穩定性和安全性依然是亟待解決的挑戰。本文分析了多種感測技術，包括溫度、氣體和煙霧感測器，以實時監控電池狀態並預警潛在風險。同時，電化學監測與光學監測技術 (如拉曼光譜和 X 光技術) 被應用於追蹤電池內部的化學結構變化，進一步提升鋰電池的安全性和性能。

通過結合多種感測技術，鋰電池的安全性有望得到顯著提升，從而有效防止熱失控等風險。這些技術將推動鋰電池在電動車和儲能市場中實現可持續發展。

展望未來，隨著新能源市場快速成長，鋰電池偵測技術的應用前景將更加廣闊。技術創新與多學科合作將推動更智能、更安全的鋰電池監控系統，為電動車、儲能系統等應用提供可靠保障，助力全球能源轉型和碳中和目標的實現。隨著新材料的引入和智能監測手段的持續優化，鋰電池的性能、安全性和壽命將達到新的高度。

參考文獻

1. Market Data Forecast, Lithium Ion Battery Market, Market Data Forecast Report, 150 (2024).
2. Intellect Markets, *Lithium Ion Battery Market*, (2024).
3. Please refer to the website: <https://is.gd/DfcURm>

4. Please refer to the website: <https://is.gd/6eYxj9>
5. Y Son, JS Lee, Y Son, JH Jang, J Cho, *Advanced Energy Materials*, **5** (16), 1500110 (2015).
6. J Liu, H Yuan, H Liu, CZ Zhao, Y Lu, XB Cheng, JQ Huang, Q Zhang, *Advanced Energy Materials*, **12** (4), 2100748 (2022).
7. MJ Loveridge, G Remy, N Kourra, R Genieser, A Barai, MJ Lain, Y Guo, Mark Amor-Segan, Mark A. Williams, Tazdin Amietszajew, Mark Ellis, Rohit Bhagat, David Greenwood, *Batteries*, **4** (1), (2018).
8. Board, N. T. S., Auxiliary Power Unit Battery Fire Japan Airlines Boeing 787-8, JA829J. Incident Report NTSB/AIR-14/01, National Transportation Safety Board, (2013).
9. Please refer to the website: <https://read01.com/zh-hk/DGj85dL.html>
10. Baird, Austin R., Erik J. Archibald, Kevin C. Marr, Ofodike A. Ezekoye, *Journal of Power Sources*, **446**, 227257 (2020).
11. Peng Bai, Ju Li, Fikile R. Brushett, Martin Z. Bazant, *Energy & Environmental Science*, **9** (10), 3221 (2016).
12. Jialiang Lang, Yuanzheng Long, Jiale Qu, Xinyi Luo, Hehe Wei, Kai Huang, Haitian Zhang, Longhao Qi, Qianfan Zhang, Zhengcao Li, Hui Wu, *Energy Storage Materials*, **16**, 85 (2019).
13. Liwei Zhao, Izumi Watanabe, Takayuki Doi, Shigeto Okada, Jun-ichi Yamaki, *Journal of Power Sources*, **161** (2), 1275 (2006).
14. Shuang, S. H. I., Nawei, L. Y. U., Jingxuan, M. A., Kangyong, Y. I. N., Lei, S. U. N., Ning ZHANG, Y. J., *Energy Storage Science and Technology*, **11** (8), 2452 (2022).
15. Ting Cai, Puneet Valecha, Vivian Tran, Brian Engle, Anna Stefanopoulou, Jason Siegel, *ETransportation*, **7**, 100100 (2021).
16. Ze Wang, Lei Zhu, Jianwei Liu, Jianan Wang, Wei Yan, *Energy & Fuels*, **36** (12), 6038 (2022).
17. Koch, Sascha, Kai Peter Birke, and Robert Kuhn, *Batteries*, **4** (2), 16 (2018).
18. Jan Philipp Schmidt, Stefan Arnold, Andre Loges, Daniel Werner, Thomas Wetzel, Ellen Ivers-Tiffee, *Journal of Power Sources*, **243**, 110 (2013).
19. 黃康哲, “聚偏二氟乙烯薄膜與布拉格光纖光柵感測器之動態量測技術研發與應用”, 國立臺灣大學機械工程學系學位論文, (2015).
20. 湯元會, 袁博興, 李傑, 張雲龍, 儲能科學與技術, **13** (4), 1326 (2024).
21. Chen, Siyan, Zhenhai Gao and Tianjun Sun, *Energy Science & Engineering*, **9** (9), 1647 (2021).
22. Plett, Gregory L., *Journal of Power sources*, **134** (2), 252 (2004).
23. Wenger, M., Waller, R., Lorentz, V. R., März, M., & Herold, M., “Investigation of gas sensing in large lithium-ion battery systems for early fault detection and safety improvement”, *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 5654 (2014).
24. Zhen Wang, Yanhao Li, Xiangnan He, Rui Yan, Zhemin Li, Yadong Jiang, Xian Li, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **401**, 134996 (2024).
25. Shaoda Zhang, Wu Bin, Binbin Xu, Xingyu Zheng, Binbin Chen, Xueqin Lv, Haisheng San, Werner Hofmann. *Nanoscale Research Letters*, **14** (1), 348 (2019).

作者簡介

宜千鈺小姐現為南臺科技大學機械工程系學士生。

Qian-Yu Yi is currently a B.S. student in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.

王聖璋先生為國立台灣大學材料科學與工程所博士，現為南臺科技大學機械系教授。

Sheng-Chang Wang received his Ph.D. in Material Engineering from National Taiwan University. He is currently a Professor in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.

蕭育仁先生為國立成功大學材料科學與工程所博士，現為高雄科技大學車輛工程系教授。

Yu-Jen Hsiao received his Ph.D. in Material Engineering from National Cheng Kung University. He is currently a Professor in the Department of Vehicle Engineering at National Kaohsiung University of Science and Technology.

光的指揮家－探索光學薄膜的奧秘

Conductor of the Light - Explore the Secrets of Optical Thin Film

陳柏荔、莊子右、陳宏彬

Po-Li Chen, Tzu-Yu Chuang, Hung-Pin Chen

當問到專業的攝影師如何拍出一張好照片，除了要有好相機、好鏡頭之外，更需要懂得如何掌握好「光線」，而攝影時所使用的濾光鏡，可以幫助攝影師控制光的性質和色彩效果，遙測衛星上的光學鏡頭也不例外，需要加裝濾光鏡來獲得最佳的遙測成像品質，然而這類遙測衛星的元件卻是國際管制輸出的項目，是你有錢也買不到的，而買不到怎麼辦呢？只能靠自己開發！國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心（以下簡稱國研院儀科中心）光學鍍膜團隊從設計、製作到測試完成，用了接近 10 年的時間，才打造出臺灣第一個自主研發用於衛星遙測系統影像感測器的「陣列式濾光鏡 (five-band filter)」，本文將探索成就陣列式濾光鏡的關鍵奧秘－光學薄膜，一起來好好認識臺灣的技術與驕傲吧！

光是什麼？

陽光、空氣、水，是人類存活的三大要素，生活在這個被光 (light) 包圍的世界，你如何能不認識它呢？神奇的光，曾經困擾科學家數百年的時間，因為它的表現時而像粒子、時而像波動，在 17 世紀時，牛頓提出光的粒子說 (例如針孔成像實驗)，認為光是由極輕的微小粒子所構成，由此可以解釋光線直進、反射、折射等現象，但卻無法解釋光在物質表面有部份反射、部份折射及干涉、繞射等現象，這些現象則必須用波動理論才能加以說明 (例如 19 世紀初 Thomas Young 的雙狹縫實驗)。

直到 20 世紀，普朗克和愛因斯坦分別因光量子理論和光電效應獲頒諾貝爾物理獎，科學家們認為光就是一種電磁波 (electromagnetic wave)，同時具備波動與粒子性質 (wave-particle duality, 波粒二象性)，一般來說，當觀察的尺度比較巨觀的時候，粒子性會比較明顯，但是當觀察尺度接近光波長的時候，波動性的繞射與干涉就會相對顯著。看得見的光，我們稱為可見光，還有眼睛看不到的紫外光、紅外光、X 光等等 (如圖 1)。光在經過物質時，會發生折射、反射，甚至產生干涉或繞射等現象，聰明的科學家發現利用光的特性，可以巧妙的應用於實際生活中，其中「光學薄膜 (optical thin film)」就是最佳的範例！

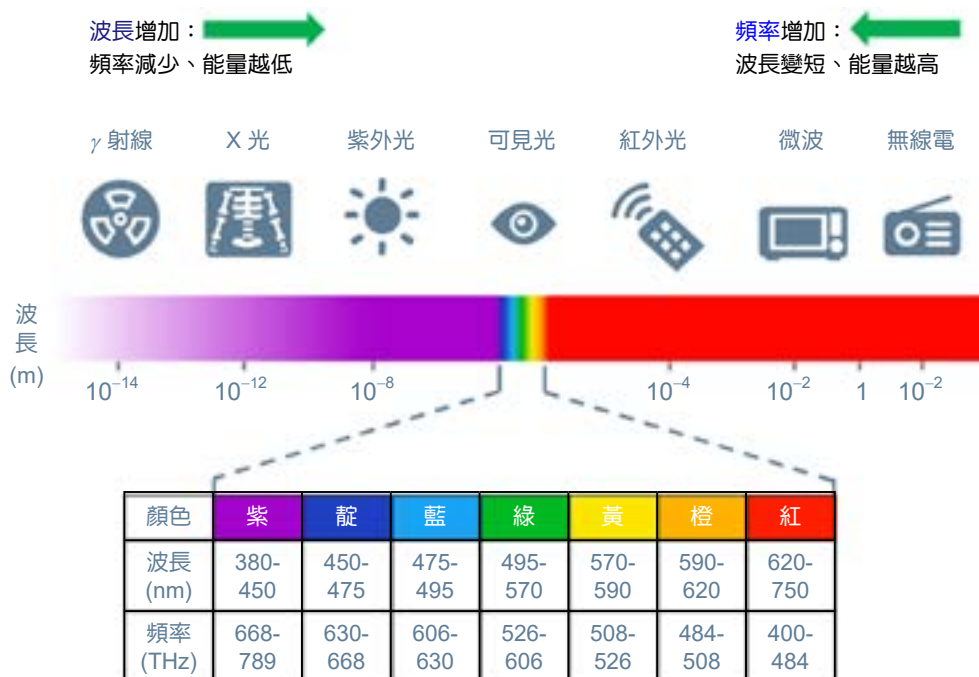


圖 1. 光譜頻譜。

光學薄膜是什麼？

五彩繽紛的肥皂泡泡 (如圖 2)、下雨天積水表面上油膜的斑斕色彩、黃蜂或蒼蠅翅膀薄膜上的彩色光芒，以及貼上手機保護貼後出現的彩虹紋路 (又稱為牛頓環)，屬於日常生活中最常看到的光學薄膜。



圖 2. 五彩繽紛的肥皂泡。

不同於陽光入射水滴經過反射與折射所形成的彩虹原理，這些光學薄膜上會產生繽紛的色彩，是因為光線進入薄膜產生我們熟知的「反射」、「折射」之外，還包含了「干涉」的結果。如圖 3 所示，光線從一個物質 (例如：空氣) 進到另一個物質 (例如：泡泡)，會發現

一部分的光線 (A 光線) 穿過交界面產生折射現象，到達薄膜內側後被反射回來，並再次穿過交界面，其餘的光 (B 光線) 則會直接從薄膜外側反射回來。這時候 A 與 B 光線會在薄膜外側組合成 C 光線，若 A 與 B 光線是以一致的步調 (A 與 B 光線的光程差是波長的整數倍) 離開薄膜外側時，振幅就會增加，稱為「建設性干涉」，若 A 與 B 光線的步調不一致，振幅會減少，稱為「破壞性干涉」 (A 與 B 光線的光程差是半波長的奇數倍)，以上這樣的物理現象則被稱為「薄膜干涉」。也就是說，當 C 光線是紅色時，代表在這個位置薄膜厚度的兩倍，恰好是紅光在介質中的波長的整數倍，A 與 B 中的紅色光線會完美的疊加形成建設性干涉，而其他顏色的光線並沒有很好地疊在一起，相互減弱造成破壞性干涉 (代表在這個位置薄膜厚度的兩倍，恰好是其他顏色的光線在介質中的半波長的奇數倍)，以至於讓該位置薄膜表面看起來是紅色的。這也是為什麼肥皂泡泡上的顏色隨時在變化，因為泡泡膜的厚度不完全均勻，而且水分持續在蒸發，只要每個位置的泡泡膜厚產生微量的轉變，光的顏色就會跟著改變呢！

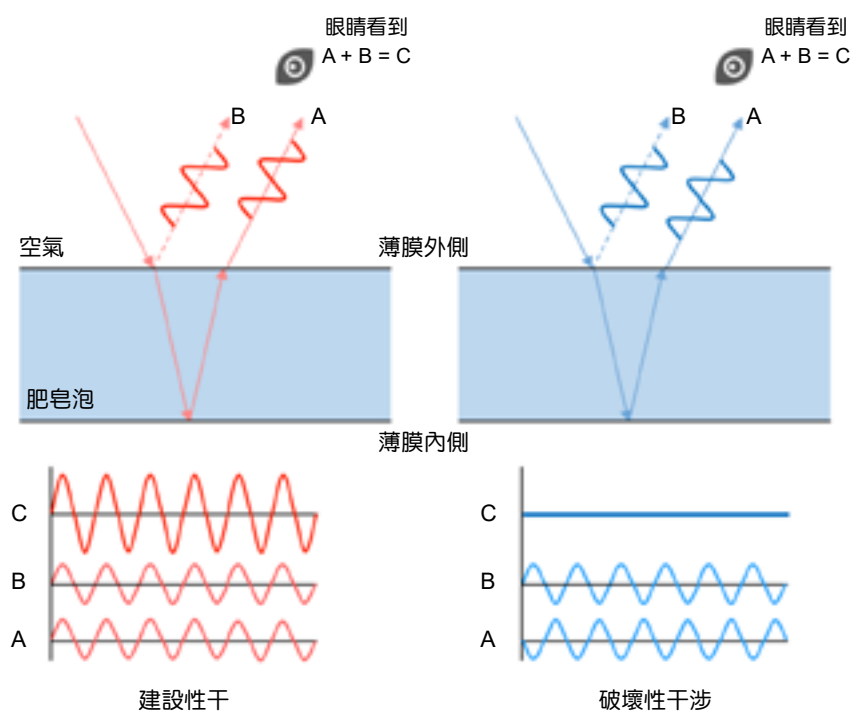


圖 3. 薄膜干涉現象。

聰明的科學家從這些自然的現象發現，薄膜厚度是很關鍵的因素，因為不同厚度會加強對應波長的顏色，而薄膜厚度必須為光進到介質內的波長的特定倍數。一般的光學薄膜其厚度需要在可見光波長的等級內 (約小於 500 nm)，此厚度範圍的薄膜因為光的干涉，以及薄膜、空間及物質間的折射率差異，可以有顯著的折射特性。科學家利用「薄膜干涉」的原理來控制光學材料折射及傳輸光的特性，例如在玻璃面鍍上單層或多層的薄膜來限制反射光或者穿透光線的顏色，也就是讓特定波長的光線產生建設性干涉，其他波長的光產生破壞性干涉。生活上常見的應用像是眼鏡、相機或工業用高精度的濾光片、家用或車用的低輻射玻璃、玻璃上的增透膜，以及汽車車頭燈的反光擋板等，都有光學薄膜來增加光的穿透或反射效果喔。

藏在光學薄膜的專業細節

為了能精確掌控光的「薄膜干涉」效果，依據反射、穿透、濾光、偏振等不同功能需求，通常會在光學元件或基板表面上鍍上單層或多層的氧化物或金屬薄膜，其性能會受薄膜各層厚度與膜層介面折射率差影響，原理為在光學系統中建立出干涉效應，讓光波傳導如反射、透射、散射和吸收等特性產生變化。而光學薄膜的製造過程就是我們常聽到的「鍍膜」，為精密光學中關鍵的一個環節。

光學薄膜的構成常以多層的薄膜為主，利用「真空鍍膜」技術，可以準確掌握各層薄膜的厚度，主要原因是在真空狀態下，薄膜材料氣化後的原子或分子可避免與環境中的粒子碰撞，除了能直線附著在基片上形成較穩定的膜層，也能準確鍍製出想要的薄膜厚度。真空鍍膜大致可分為物理沉積法 (physical vapor deposition, PVD) 與化學沉積法 (chemical vapor deposition, CVD)，一般常聽到的蒸鍍 (evaporator) 與濺鍍 (sputtering) 就是屬於物理沉積法。



圖 4. 儀科中心的 (a) PVD 系統。(b) 蒸鍍系統。(c) 濺鍍系統。(d) CVD 系統，可提供各式光學薄膜的服務。

鍍膜方法的選擇取決於光學薄膜的設計，考量的因素包括了鏡片本身的材料，一般有塑膠、玻璃、金屬等，還有應用的目的與環境，例如太空中或衛星上的遙測望遠鏡，大型天文望遠鏡，或是半導體製程用的曝光機鏡頭與濾光片⁽¹⁾，或者一般的光學顯微鏡，或可用於研究腦科學的層光顯微鏡，以及應用於影像感測器前的濾光片等，不同的使用波長以及環境要求所要製鍍的光學薄膜可是大不相同的，且影響鍍膜品質的因素相當多，需要經驗豐富的專門人員才能掌控製造流程與成品功能，是一門非常注重細節的專業技術。



圖 5. 儀科中心研製之 (a) 福衛五號遙測系統實驗體。(b) 曝光機用 REMA 鏡頭。(c) 曝光機用濾光片。(d) 曝光機用抗反射鏡。(e) 藍光顯微物鏡。(f) 大口徑顯微鏡頭。

光學薄膜使用的材料也相當多元，通常會利用低折射率 (如氧化矽或氟化鎂) 及高折射率 (如氧化鈦系或氧化鋁) 材料搭配製造而成。高折射率材料除了擁有高折射率的優勢，化學特性也比較穩定，且不溶於水、疏水性佳、附著力強、電傳導力低，經常用在半導體元件、潑油性薄膜等領域中；而低折射率材料則具備良好的附著性、耐刮性和耐酸鹼性，同時結構也非常穩定，不太會跟其他材料產生反應和變質。光學鍍膜技術透過選擇不同材料和製程，才能夠製造出各種具有特殊光學性質的薄膜，進一步廣泛應用於各種光學元件的表面，如鏡片、手機及相機鏡頭、濾光片、光學儀器、晶圓，還有光通訊的相關元件或設備等。

光學薄膜應用

在了解光學薄膜可以改變光的反射、穿透、吸收及散射等程度的原理後，透過巧妙的光學設計、薄膜材料的挑選，以及精密的真空鍍膜儀器設備等技術，就能製造出各種應用在生活、科學及工業上的單層或多層光學薄膜。濾光片的顏色、波長與頻率可由圖 1 得知，如圖 6 所示，對應光譜波長的位置，即可看到鏡片所呈現出該波長位置的顏色 (可見光)。



圖 6. 鏡片所呈現出該波長位置的顏色 (可見光)。

目前常見的光學薄膜類型及其功能整理如表 1。

表 1. 常見的光學薄膜類型及其功能。

類型	功能	應用
反射膜 (Reflection coating)	• 增加反射率	照明設備、檢測儀器、望遠鏡、顯微鏡、雷射系統、曝光機
抗反射膜 (Anti reflection filter, AR)	• 低反射 • 提高單一波長或某波段的穿透率	顯示器、太陽能電池、LED、相機、投影機、光學儀器
短波通濾光片 (Short pass filter)	• 可讓較短波長的光通過，並將不需要的波段吸收或反射	視訊鏡頭、監視鏡頭、冷光燈、顯示器、內視鏡、微創手術鏡頭、顯微鏡、檢測儀器
長波通濾光片 (Long pass filter)	• 可讓較長波長的光通過，並將不需要的波段吸收或反射	檢測儀器、5G 通訊、生醫儀器、量子電腦
帶通濾光片 (Band pass filter)	• 可選擇讓特定波長或某波段範圍的光通過，其他的光則會被吸收或反射	相機、投影機、顯示器、顯微鏡、檢測儀器
分光鏡 (Beam splitter)	• 可以將一束光線分成兩束	干涉儀、雷射、照明、光纖、醫療、半導體等儀器

此外，光學薄膜也可以應用在人文藝術方面，方法是在玻璃基板表面鍍上設計好的光學薄膜，完成鍍膜後，於上方加上一塊玻璃，進行燒結熔融，光學薄膜的材料，會因高溫退火而產生顏色飄移，物理學上稱為「藍移現象」¹，利用膜堆設計與調整退火溫度就可製成色彩繽紛的裝飾膜 (如圖 7)。這便是利用科學技術來提升生活中的文化素養，為世界增添多元色彩。

1. 藍移 (blueshift) 是指電磁波由於某種原因導致波長變短、頻率升高的現象，在可見光波段，表現為光譜的譜線朝藍端移動了一段距離。



圖 7. 儀科中心鍍製的裝飾膜元件。

臺灣第一「陣列式濾光鏡」

福衛五號衛星遙測酬載 (remote sensing instrument, RSI) 是臺灣第一枚自主研製的高解析光學遙測衛星，軌道高度 720 公里，對地解析度 2 公尺，相當於拿著望遠鏡在 101 大樓上可以看到地面的螞蟻。想像一下，你扛著福五相機要拍 7 百多公里以外的物體，相機光學架構如圖 8 所示，物體上的反射光經過長距離的傳送，透過主次鏡與修正透鏡的反射與折射，並經過濾光鏡後收集聚焦於感測器上，再將光的訊號轉為電子訊號，回傳到地面接收站，最後由電腦依據各波段光的強度，還原成彩色照片。可想而知，要成就出高解析的影像品質，考驗著福衛五號的光學系統團隊對於鏡片、濾光片與感測器等各個環節設計、製作與組裝驗證的能力。

福衛五號遙測系統的 CMOS 影像感測器 (Complementary Metal-Oxide Semiconductor，互補性氧化金屬半導體) 在一個基板上整合了五條線型 CMOS 影像感測陣列，並且封裝成一個大型的影像感測器，具有成本低、省電、訊號傳輸快速等優勢。如圖 9 所示，在 CMOS 影像感測器前方的是一片像五線譜的陣列式濾光鏡或稱為多光譜帶通濾光片，從上而下分成五區，能將通過望遠鏡的光線分成五道不同顏色的光穿透，包括藍光、綠光、白光 (就是所有波長的可見光)、紅光、近紅外光，同時吸收或反射不需使用的其他波長，再分別讓五條 CMOS 線型感測器接收。

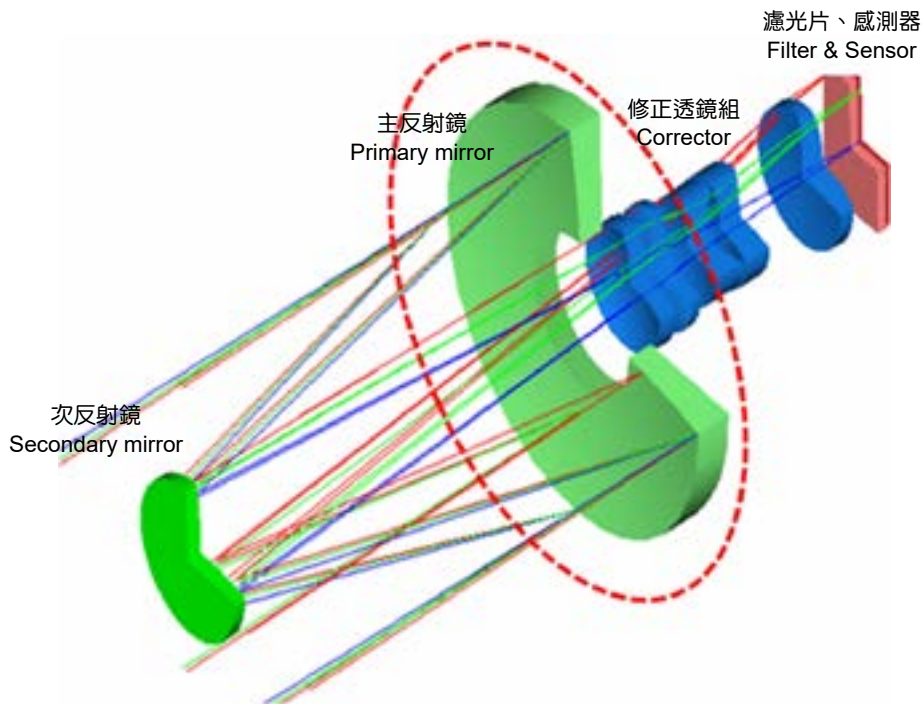


圖 8. 福衛五號遙測系統的光學架構。

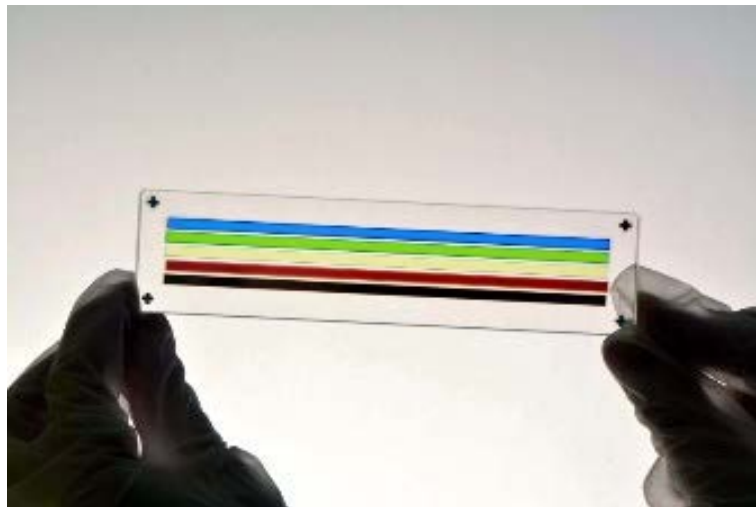


圖 9. 福衛五號遙測系統的陣列式濾光片。

陣列式濾光鏡這項關鍵元件的設計與製造比市面上的濾光鏡困難許多，包含了濾光鏡的光譜設計，以及如何結合微影製程製作微米級精度的陣列式濾光鏡，為完成本項任務，國研院儀科中心依賴深耕多年的光學薄膜製程技術與經驗，以及克服三大挑戰，從設計、製作到測試完成，用了接近 10 年的時間，才打造出臺灣第一個自主研發用於衛星遙測系統影像感測器的「陣列式濾光鏡 (five-band filter)」，所以光學薄膜為高解析衛星中最重要且困難的關鍵技術之一。

挑戰一：光學薄膜設計與製造

國研院儀科中心依 CMOS 影像感測器所需要的五個濾光波段規格進行光學薄膜的設計，且穿透率需要高於 90% 才算合格，如圖 10 所示，以藍光波段的濾光片為例，為了得到精確的濾光波段，透過有經驗的鍍膜團隊進行設計，計算出多層薄膜應使用的材質和每層厚度，並進行多層膜堆的優化，由一般濾光片的常用的 20 幾層薄膜堆疊提升至近 100 層的薄膜堆疊。

常見的薄膜設計方法中包括由 H. A. Macleod 所開發出來的導納軌跡圖示法 (admittance diagram)，這是一種可以精準計算膜厚的方法，由導納軌跡可以看出膜層成長的走向，因此可以清楚地判斷如何設計出最佳的膜系，特別對於同一膜系在不同波長的光學成效 (optical performance) 的分析非常方便。由於導納軌跡表示了膜的成長走勢，因此可以利用導納軌跡圖來做為鍍膜時的光學厚度監控，且在鍍膜過程中常會發生鍍膜厚度與原設計有所出入的現象，可以藉由導納軌跡圖來進行計算修正，及時修改膜層設計而得到補償的效果，有興趣的讀者可參考相關文獻⁽²⁾。

每層薄膜製鍍的厚度與薄膜材料的折射率都需要精準的掌控，若厚度誤差 2%，就會造成 2% 的波段漂移，因此，團隊採用高精度光學監控之離子源輔助電子槍蒸鍍系統進行光學鍍膜，且每層薄膜鍍製後都需要將真空系統的腔體再抽至底壓 ($< 5 \times 10^{-6}$ Torr)，以降低薄膜層與層之間的交互污染，提高薄膜的穩定性與品質，由此可知，僅一種波段將近 100 層光學薄膜的鍍製時間就可能高達 24 小時以上！

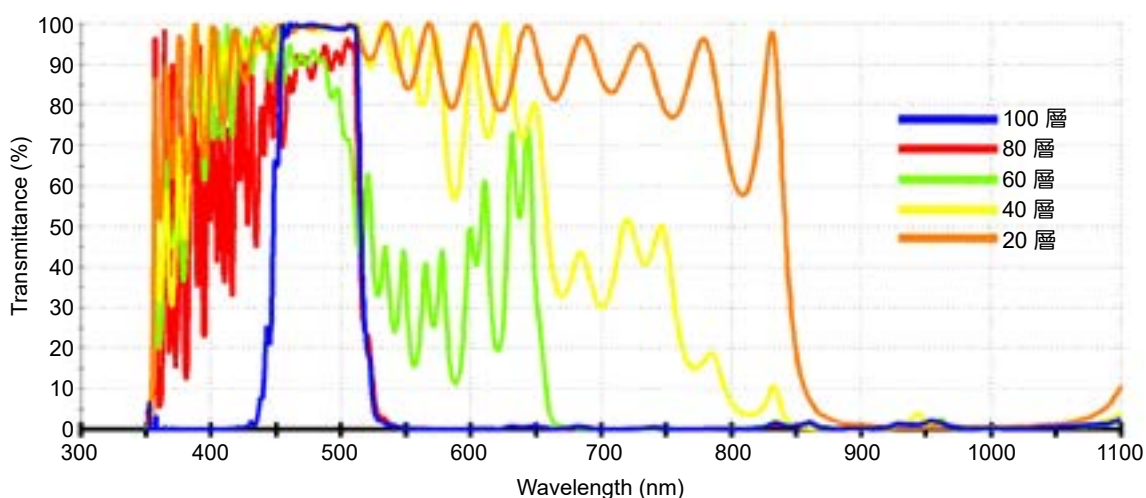


圖 10. 藍光波段濾光片不同薄膜層數的反射率。

挑戰二：微影薄膜製程及圖案轉移

如圖 9 所示，陣列式濾光鏡從上而下有五條不同波段的濾光區域，各個區域之位置、寬度及間距需被精確定義後，才能開始進行薄膜層的製鍍，且在製作其中一個區域時，需要將其他區域有效地遮蔽，在比較乾式蝕刻、濕式蝕刻與金屬光罩等不同設計與圖案轉移的製程方法之優缺點後，團隊最終利用半導體製程中的黃光微影製程應用於精準定義位置與尺寸，並選擇適當的光阻以便在薄膜鍍製的過程中能有效抵抗基板溫度和高能離子轟擊的損傷，再

採用掀離法 (lift-off process) 來獲得精確的圖案轉移，這樣的製程需要重複進行五次，才能完成不同波段的陣列式濾光鏡，最後製鍍上抗反射膜 (anti-reflection, AR) 以降低穿透光之反射，如圖 11 所示，陣列式濾光鏡五個不同波段的穿透率皆高於 90%，有助於提升衛星遙測光學酬載系統的收光量與解析度。

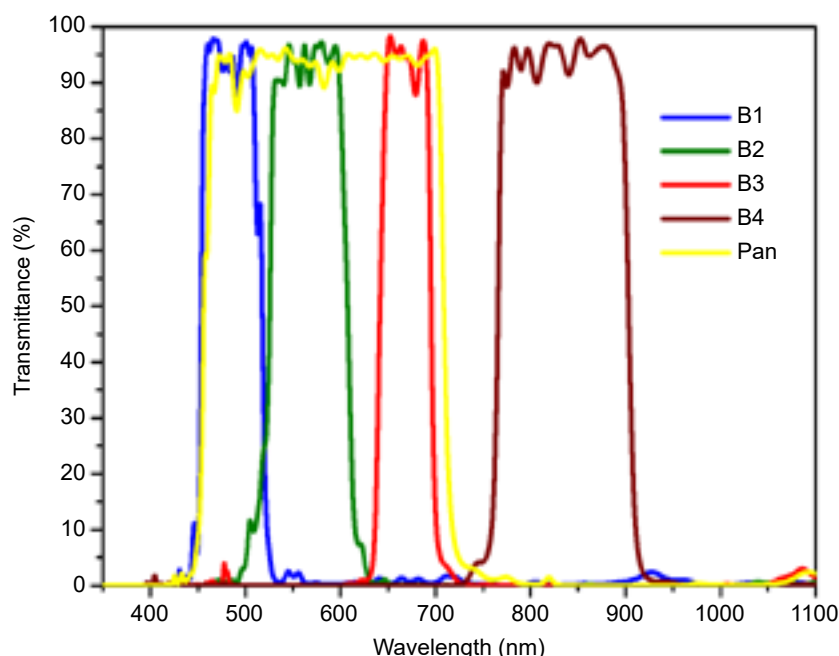


圖 11. 福衛五號陣列式濾光鏡之光譜圖。

挑戰三：太空環境測試

為了開發符合太空規格的陣列式濾光鏡，還需要依據 ISO-9211 光學鍍膜規範下進行光學薄膜基本測試與環境測試，以檢視陣列式濾光鏡對於各項影響的耐受程度。基本測試包括穿透率、反射率、折射率等光學性質測試，以及附著性、表面粗糙度等機械特性測試與分析；環境測試則需要通過 35 kRads 的輻射損傷、100 次溫度 80K 至 320K 的熱循環測試，以及 24 小時 65 °C、95% RH 的溼度測試⁽³⁾。在接受過這些嚴格的測試項目並符合條件後，才算是真正完成關鍵的陣列式濾光鏡開發。如圖 12 所示，可以明顯觀察到經由太空環境熱真空測試後穿透率沒有明顯衰減，平均透過率損失小於 1%，且通過百格刀附著力測試 (cross-cut test)。

結論

國研院儀科中心是臺灣高階光學與精密系統的研發基地，在國內是光學領域的領頭羊，提供光學解決方案的專家，累積 50 年光學設計與鏡片製作經驗，在鏡片的拋光與鍍膜都是專家中的專家。接續「提升遙測衛星成像品質的秘密開箱全臺灣唯一的大口徑非球面鏡」的介紹²，本文為探究臺灣第一個陣列式濾光鏡的關鍵奧秘，透過深入淺出的方式，引導讀者

2. 詳見陳柏荔、林麗娥、魏崇倫、莊子右，〈提升遙測衛星成像品質的秘密－開箱全臺灣唯一的大口徑非球面鏡〉，《科儀新知》，第 237 期，2023 年 12 月，頁 97-105。

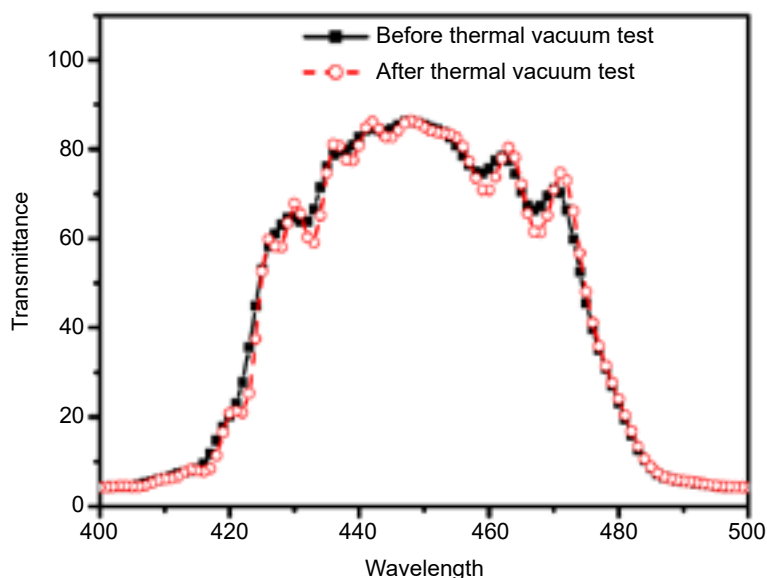


圖 12. 太空環境熱真空測試前後之光譜圖。

認識光學薄膜的基本原理與製作方式，拓展至常見的生活、科學與工業上的應用，延伸至由儀科中心所自主開發用於衛星遙測系統的「陣列式濾光鏡」，藏在其中的專業細節以及設計、製造與測試的各項挑戰，都是造就我國的遙測衛星關鍵技術發展上的重要里程碑，這類太空科技的關鍵元件，大多是國際管制輸出的項目，不是有錢就能買到的，臺灣需要自主開發的關鍵技術就由國家級的研發單位來挑戰與實現。

參考文獻

1. 邱柏凱, 蔣東堯, 蕭健男, 陳峰志, 科儀新知 222 期, 淺談近年光學薄膜之應用 (2020).
2. 李正中, 光學薄膜與鍍膜技術 第九版, 藝軒圖書出版社 (2019).
3. 邱柏凱, 陳宏彬, 蕭健男, 陳峰志, 科儀新知 217 期, 遙測酬載陣列式濾光鏡設計與製作 (2018).

作者簡介

陳柏荔女士為國立清華大學動力機械博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。
Po-Li Chen received her Ph.D. in Power Mechanical Engineering from National Tsing Hua University. She is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

莊子右先生為國立成功大學工業設計碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心佐理工程師。

Tzu-Yu Chuang received his M.S. in Industrial Design from National Cheng Kung University. He is currently an Engineering Assistant at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳宏彬先生為國立中央大學光電科學與工程博士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Hung-Pin Chen received his Ph.D. in Optics and Photonics from National Central University. He is currently an Associate Researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.