

環境感測器 陸海空全面覆蓋中

■文：任苙萍

越是不確定的年代，人們越渴望透過科技手段來趨吉避凶，因而促成「環境感測」的興盛；不外乎作為污染防治監測、天災人禍預警、營造理想環境、公共資源配置或人類經濟發展的環境影響評估 (EIA) 之用，可概分為物理與化學感測兩種。前者旨在估量溫、濕、風、光、熱、磁、流量、液位、壓力、位移和聲音等物理特性，後者則是檢測特定固／液／氣體的組成分子結構、濃度、溶氧量 (DO) 及酸鹼值等電位變化。研調公司 Research Cosmos 表示，環境污染日益嚴重加上低成本、可攜性以及化工分析的加持，化學感測器市場表現突出。

該公司預估，2017 年全球光學化學感測器的市值為 185.6 億美元，2018 ~ 2023 年的年複合成長率 (CAGR) 為 7.20%、達 281.6 億美元；車輛艙內空氣品質系統和商業物業通風需求增加，以及經濟活動對於空氣和水質監管趨嚴，光學化學感測器是增速最快者。另一機構 Transparency Market Research (TMR) 指出，人口爆炸與極端氣候是全球環境感測市場的兩大動力，而政府部門是主要推

手，以空氣和水資源部門為大宗；亞太區因缺水、空氣污染、淡水成本攀升及快速工業化，成長力道最強，而北美將主導環境感知和監測技術並加強環境法律的執行。

精準農業形塑友善環境

Research and Markets 則特別留意到「土壤濕度感測器」市場，預估 2018 ~ 2023 年之 CAGR 為 14.63%，終值達 3.854 億美元，農業、運動草坪、景觀美化等皆是促進市場增長的關鍵，另氣候變化、水資源減少、受威脅的棲息地等環境因素，也是助攻

部隊；其中，農業土壤水份測量格外重要，但農民缺乏意識和慣於使用傳統方法可能造成制約。著眼於土壤健康的可持續性，美國農業部 (USDA) 和農業研究服務部 (ARS) 正積極研究土壤與環境的交互作用——土壤健康對於氣候的衝擊，以及農作物產量和水消耗量的依存關係。

在運動草皮中使用土壤濕度感測器的情況亦有增無減，隨著全球高爾夫球場和運動場數量增加，有助於優化灌溉。加拿大政府亦宣佈自今年 4 月 1 日起的三年內，投入 2,500 萬美元用於農業清潔技

圖 1：美國農業部 (USDA) 和農業研究服務部 (ARS) 科學家正在調查境內每種主要作物和許多特種作物的品種，尋找賦予耐旱性和抗病性的基因



資料來源：<https://www.usda.gov/media/blog/2012/08/28/usda-research-prepares-farmers-change>

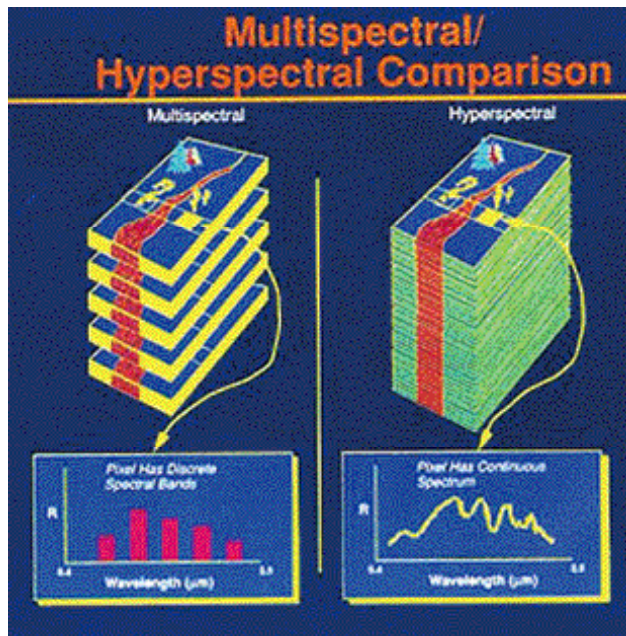
術以減少溫室氣體排放。「精準農業」(Precision Agriculture, PA) 是另一個重點——亦被稱為衛星農業或特定作物管理 (SSCM)，目標是為整個農場創建一個管理決策支援系統，精準定位區域並盡可能創建變量的空間變化圖，包括：作物產量、地形特徵／地形、有機質含量、水份含量、氮含量、酸鹼值、電導值 (EC) 等。

將感測器測量數據、多光譜圖像與可變速率技術 (VRT) 的衛星圖像結合使用，協助農作者有效優化投入資源、減少對環境的傷害，並改善養份和水份、減少雜草競爭，優化病蟲害管理策略。例如，利用無人機／衛星型無人機識別受壓樹木、灌溉／漏水並製作樹木庫存的地圖。基於光譜視覺感測系統的機器學習 (Machine Learning) 和人工智慧 (AI) 正在改變現代農業——智能噴霧器可檢測、識別單一作物和雜草，將除草劑精準噴灑於雜草，較傳統噴霧器節省逾 90% 的用量，機器人收割機則能檢測並判定作物的成熟度。

光譜分析為視覺感測核心技術

經過深度學習 (Deep Learning) 更具有檢測疾病症狀並區分病原體的能力——從原始數據庫發現初級特徵，再融合不同層次數據的演算法可提高系統性能，自動揪出病變元凶或防患於未然。視覺感測的核心技術是光譜分析，已廣泛用於特徵光學吸收或發射光譜

圖 2：高光譜 vs. 多光譜數據比較



資料來源：<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MultispectralComparedToHyperspectral.jpg>

別材料，有高光譜成像 (HSI) 和多光譜成像 (MSI) 兩種。高光譜強調高精度，多用於檢測氣體洩漏或污染、辨識地球表面的衛星成像以及醫學影像診斷。如何從影像的每個像素捕獲高品質的光譜數據並推斷化學成份為其關鍵，包括：動態頻寬範圍、解析度、光量損耗和訊號雜訊比 (SNR) 等。

對於一般工業應用來說，可由多個 LED 或光學濾波器提供的多光譜成像或更經濟實惠。多光譜只需簡易波長選項即可對特定材料／污染物定義，來檢測食品／農作物／有機物質。英國 Chelsea Technologies Group (CTG) 日前展示包括三個光通道 (吸收、濁度和溫度) 的新型 V-Lux 感測器，可對藻類參數、多環芳香族碳氫化合物 (PAHs)、有色溶解有機物質

(CDOM) 和細菌的色胺酸螢光進行原位螢光測量的可追溯性和線性化，不會受到非目標化合物的螢光、濁度和濃度干擾，可改善讀數準確性，適用於廢水處理、水域排放污染及養殖水質鑑定。

另一值得關注的光感測是由日本筑波大學開發、基於螢光樹形大分子的多孔

結晶纖維感測器，可「肉眼檢測」平時不易察覺的溶劑蒸氣。纖維的高孔隙率可增加溶劑分子的吸附能力，使排放行為對於溶劑蒸汽的反應更靈敏；樹狀聚合物纖維的薄膜會依其曝露的溶劑蒸氣極性，在兩秒鐘內迅速變化不同顏色，根據發射光的強度／波長變化顯示有機污染物的存在。這意味著可使用單個薄膜來檢測多種類型的溶劑，且當溶劑蒸氣被移除時，薄膜就會恢復原來的顏色，可重新使用。

感測器資料 + 高解析圖像，地球觀測 (EO) 強力放送

使用光譜儀原理的，還有美國國家航空暨太空總署 (NASA) 名為「地球靜止碳觀測站」(GeoCarb Observatory 或簡稱 GeoCarb) 的

衛星，可經由地球靜止軌道看到不同的天氣模式如何牽動二氧化碳和甲烷濃度，解決碳循環一些懸而未決的問題。例如，亞馬遜流域對地球大氣層的影響？美洲大陸的甲烷排放估計值是否低估？GeoCarb 使用光柵光譜儀，在所有天氣條

件下測量「太陽誘發的葉綠素螢光」(Solar-induced chlorophyll Fluorescence, SIF)，以追蹤乾旱對森林、作物和草地光合作用的連結，並增加第四個光譜帶測量一氧化碳和甲烷。

與此同時，利用感測器資料和

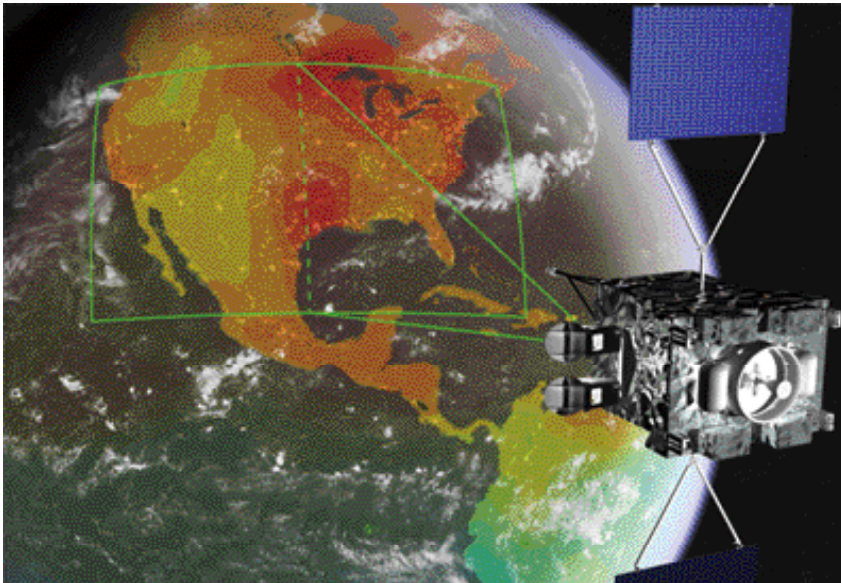
高解析度圖像組合的「地球觀測」(EO)，亦成環境監測要角。近兩年剛崛起的「新太空」(New Space，指大量發射小衛星的新業態)之新創公司 Satellite Vu，擬推出高解析度、能不分晝夜提供紅外線成像並每小時重複訪問的衛星，透過全天候測量海洋中的碎片、幾近即時監測塑料污染狀況並追溯來源。此外，全球首個可識別溫室氣體排放源的天基系統業已啟動——基於對流層監測儀 Tropomi 的大氣感測器、配合歐洲太空總署 (ESA) 的衛星，可將各種有害氣體和氣溶膠羽流 (plume) 映射到工業設施和城市。

Tropomi 能偵測甲烷 (CH₄)、一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO₂)、氮氧化物 (NO_x) 等，以更高的解析度顯示污染物、每日繪製排放圖，觀測特定區域的排放分佈；它將持續與第二衛星的所有者交換訊息，偵測是否有危險氣體外洩？是否符合排量限制和交易規範？氣體偵測對於畜牧業亦至關重要，透過了解乳牛的排尿模式，可制定對策緩解氮素淋溶 (Nitrogen leaching) 損失；將壓力和溫度感測器連接到乳牛排尿口以擷取排尿量 (內嵌折射率感測器)，用它來測量氮濃度、評估給予不同飼料的畜牧成果。養雞場亦須對氨氣 (NH₃) 進行控管，以免雞隻食慾不振。

「溶氧量」表徵水質優劣，海洋動靜暗示生存危機

聯合國教科文組織表示，排

圖 3：GeoCarb 的任務是將主要碳氣體的濃度映射到地球靜止軌道上



資料來源：<https://www.nasa.gov/feature/jpl/geocarb-a-new-view-of-carbon-over-the-americas>

圖 4：Sentinel-5 Precursor 攜帶一台 Tropomi 成像光譜儀，能及時提供影響空氣品質與氣候的多種微量氣體和氣溶膠數據



資料來源：<http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/06/Sentinel-5P>

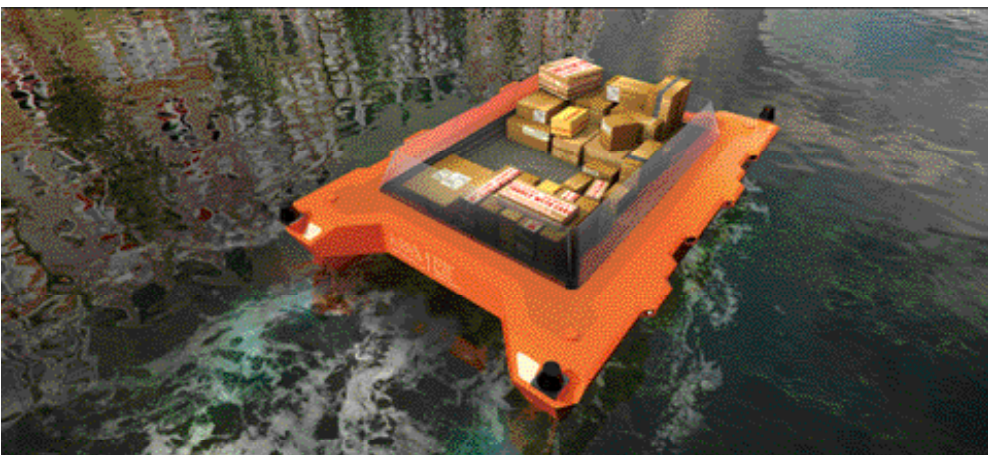
污口和農業徑流中過量的營養物質，會導致海洋生物無法生存、嚴重破壞生態。眾所周知，大量有機質排入水域會加速優養化，使藻類快速繁殖，之後又得耗費水中氧氣進行分解，使水中溶氧量大幅降低；逆向思考，「溶氧量」正是偵測水質的一項重要指標，廣泛用於食品攝入保護、河流監測、水產養殖、生物製藥等領域，更是污水／飲用水處理的必要參數，也可用於發酵或細胞培養等生物加工；此類感測器借助測量液體中存在的氧氣分壓，判定液體所攜帶或溶解的氧氣量是否達標？產生的訊號與氧氣量成正比。

按技術區分，溶氧量感測器可分為光學和電化學兩種；光學仍在發展階段，而電化學已多見於日常應用。微型化安裝和精簡維護時間是推動溶氧感測器市場成長的主要因素，近來更興起與智能感測器管理 (ISM) 技術整合趨勢，以提升訊號準確度和穩定性——溫度、鹽度、大氣壓力和流量皆是高權重

的變數，將有助於實現高效的維護計畫並極大化連續和批量生產的產量。有鑑於水質監測與人類生活息息相關，荷蘭已出現藉機器人船模型 (Roboats) 在阿姆斯特丹運河運輸包裹之便，監測水質並收集數據的使用情境，可更有效清理運河中的浮動廢棄物。

海洋動靜更關乎全人類的生存空間。南極碩果僅存的拉森 C 冰棚 (Larsen C Ice Shelf) 在 2017 年夏季，曾有重達 1 兆公噸的冰棚從主體脫落；一旦完全解體，恐導致海平面上升 10 公分之多。將聲納感測器搭載在機器人帆船可測量冰層底部的粗糙度，以預測天氣、保育漁獲資源及野生海洋動物。測量海平面有多少能量逸失到空氣中？何時、何地發生？可推估驅動風暴系統的強度和頻率，掌握極端天氣徵候。在海岸設置內嵌感測器、被稱為「先鋒陣列」的浮標，則可洞悉洋流動向、收集板塊／火山活動資訊、寄居其上的生物和海洋學之間的因果關係。

圖 5：「roboat」是麻省理工學院 (MIT) 和阿姆斯特丹先進城市解決方案研究所 (AMS) 共同合作的研究專案，可使用新的環境感測器監測城市水域



資料來源：<http://senseable.mit.edu/roboat/>

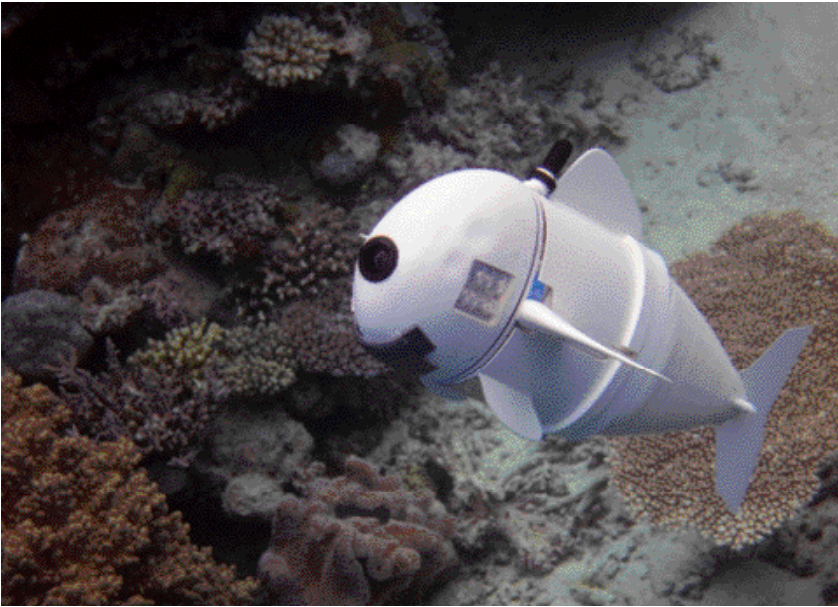
將搭載壓力感測器的海底觀測站串聯成「密集海底網路系統」(DONET)，並將其與地震儀連接，建立更快的地震預警。至於監測水位或洪水預警的液位感測器，通常有下列三種：

- 1. 壓力：**測量位於其上的水壓力或重量，為接觸式的被動感測，須在底部進行更精確的測量，可能會有液體不穩定或流動碎片損壞感測器的風險，但卻是測量井水深度最有效的液位感測器；
- 2. 超音波：**測量回波擊中目標並返回感測器所需的時間，通常部署在需要監測的流體上方，為非接觸式的主動感測；
- 3. 雷達：**採用探頭將來自感測器的高頻雷達和電磁波引導至正在監測的水位，後根據雷達脈衝返回的時間長短估算，所輸出的波形和脈衝可穿透泡沫或蒸氣等可能干擾真實水平測量的事物，是三者中最昂貴的選項。

仿生機器出籠扮偵探，活體生物變身「有機感測器」

為更加悄無聲息地近身觀測物種與環境的互動，不少科學家致力於開發「魚目混珠」的仿生機器。美國能源部在 2014 年發佈了一款「Sensor Fish」感測器，可在中性浮力設備／水電設施中移動時對壓力、加速度、湍流和其他力量變化，提供關於魚群的訊息回饋、改進更多魚類友善型的風力渦輪機和水力發電設計，以提高魚群

圖 6：憑藉起伏的尾巴和獨特的能力控制自身的浮力，SoFi 可直線游泳、轉身或上下潛水



資料來源：<http://news.mit.edu/2018/soft-robotic-fish-swims-alongside-real-ones-coral-reefs-0321>

存活率並減少單一魚類受傷機會。另一款由麻省理工學院 (MIT) 所設計、內建環境感測器並採用聲波發送編碼訊息的「SoFi」軟機器魚，可協助釐清海洋生物與生態系統的交流作用。

更有甚者，索性讓「活體」充當感測器。澳大利亞的海洋生物學家則正使用新一代感測器標籤，將其連接到魚翅上以計算魚群在水中消耗的能量，透過食物鏈的能量流動了解生態系統，並測量周圍水域的溫度和壓力，讓研究人員便於追蹤魚群；或測量魚群心率和水中

溶氧量，預防近岸鮭魚養殖造成海洋缺氧。美國國防高等研究計劃署 (DARPA) 更擬訂「持久性水生生物感測器」計畫 (PALS，瀕危物種和智能哺乳動物除外)，將部署在戰略敏感的海洋區域，收集生物對水下交通工具的反應，包括海軍艦艇潛伏在海浪下的威脅，可能改變戰場通訊型態。

另受限於材料或功能，有機污染物感測器難以在特定環境下使用，有研究人員利用微生物製作「有機感測器」，並測試高孔隙率塑料和生物基薄膜，以優化電生菌

可覆蓋的表面積。例如，將感測器貼附在天然氣的管道外部，利用通過一連串壓力和酸鹼值條件考驗的細菌，藉代謝過程將電子釋放到環境中、即時檢測氣體是否有洩漏，避免引發環境災難和燃料分配中斷。其工作原理是：由消耗碳基元素 (碳氫化合物) 的細菌生成陽極電子，穿過電阻器到達陰極並就地駐留，促進電子流動；陽極細菌的代謝過程將使感測器的電壓隨之增加，揭示潛在的洩漏。

類似「電化學」感測亦可用於土壤、水域 (包括海洋漏油) 和有害氣體檢測。據統計，伴隨天然氣生產的甲烷洩漏迫使美國工業每年須花費 50 ~ 100 億美元善後，而全球如火如荼推行的碳定價計畫與碳排放交易，對環境感測需求亦有助長之功。有業者認為，未來大工業排放需要感測器的「分層系統」，且有些國家將把溫室氣體排放的衛星監測業務外包給私人企業，是新商機所在；對沖基金、石油和天然氣公司的投資者，力行節能減碳的公部門、環保組織和保險公司，以及垃圾掩埋場、農畜牧場、發電廠和天然氣廠商，都是感測數據的潛在買家。CTA

下期預告：

智慧汽車