

衛星遙測技術於跨國流域治理之應用 —以「湄公大壩監測」計畫為例

劉翎端

國家安全研究所

壹、前言

近年來衛星遙測技術隨著新觀測平台產生，以及開放資料（Open Data）的普及化，應用愈加廣泛多元，更成為跨國合作進行環境監測、災害救援以及打擊犯罪的利器：例如美國太空總署（NASA）、歐洲太空總署（ESA）、歐盟哥白尼地球觀測計畫（Copernicus Programme）合作之哨兵六號（Sentinel-6）衛星，用來觀測全球暖化導致之海平面上升變化，監測熱浪與颶風，及提供更精準的海象資訊以增進作業船隻安全。¹ 而由日本主導、28 國參與的守望亞洲（Sentinel Asia）倡議，旨在串聯跨國衛星能量，提供亞太地區近即時（near-real-time）自然災害資訊。² 另外，非營利國際組織—全球漁業觀測站（Global Fishing Watch）亦結合衛星與船舶自動識別系統（automatic identification system, AIS）偵測非法漁業捕撈活動。³ 國際刑警組織（INTERPOL）則自 2018 年起，每年執行「海上 30 天行動」（Operation 30 Days at Sea），透過衛星影像及遙測載具，查緝全球各地河川海洋廢棄物之非法傾倒與走私活動。⁴

除了上述案例外，衛星遙測技術也被運用在跨界流域的水體監測上，以平衡跨界水資源分配不均的問題。聯合國即指出，跨界流

¹ “Recent Developments in Remote Sensing and Earth Observation,” GIS LOUNGE, 2 August 2020 <https://reurl.cc/NX5pAp>; Sentinel-6 Michael Freilich satellite ensures continuity of sea-surface height measurements, UN-SPIDER, 30 November 2020, <https://reurl.cc/jqXk1n>;

² “JPT members,” Sentinel Asia, <https://reurl.cc/qm9Okp>

³ “Illuminating global fishing activity with satellite AIS tracking,” Spire Global, 4 June 2020, <https://reurl.cc/jqXD5m>

⁴ “Marine pollution crime: first global multi-agency operation,” INTERPOL, 13 November 2018, <https://reurl.cc/ZQRy1l>; “Operation 30 Days at Sea 3.0 reveals 1,600 marine pollution offences worldwide,” INTERPOL, 29 April 2021, <https://reurl.cc/pmQ5La>

域占地球上約六成的淡水資源，並提供全球近四成人口的用水需求。⁵ 氣候變遷對於水資源的衝擊，更突顯出合宜的流域治理，對維繫區域社經發展與政治穩定的重要性，而發源自中國、蜿蜒於中南半島的湄公河即為代表案例：1990 年代起，中國陸續於湄公河上游瀾滄江築壩、興建水力發電廠，大幅改變河川原有水文生態，其不透明的管理方式與無預警的水位調節，不僅影響下游地區的水稻、觀光與內陸養殖漁業，亦危及沿岸社區用水與居住安全。

由於湄公河流域範圍尚涵蓋泰國、越南、緬甸、柬埔寨、寮國等五國，當中除緬甸以外的其他四國，雖已自 90 年代中期已成立「湄公河委員會」(Mekong River Commission, MRC)，然受限於與中國之間既合作又多所疑慮的矛盾外交關係，多年來在水權的協商與對話上成效並不佳。而湄公河的流域治理亦提高美國對中南半島的關注，自 2009 年起偕同 MRC 提出「湄公河下游倡議」(*Lower Mekong Initiative, LMI*)，2020 年 9 月擴大為「湄公河-美國夥伴關係」(*The Mekong-U.S. Partnership*)，重點推動項目即包含湄公河水資源利用之揭露。同年 12 月 15 日進一步推出「湄公大壩監測」(*Mekong Dam Monitor*) 計畫，彙整下游各國所蒐集與分析之水文資訊，並透過衛星影像、地理資訊系統 (*Geographic Information System, GIS*) 之分析掌握上游水文變化，發佈於線上平台，提供全球使用者查詢參考。⁶

本文將以此「湄公大壩監測」案例，探討衛星影像與遙測技術於跨界流域治理之應用與成效，以及其對區域地緣政治及權力平衡可產生之助益。

⁵ “Reviewing progress on transboundary water cooperation in the world,” United Nations Economic Commission for Europe, 13 October 2020, <https://reurl.cc/pmqW3r>

⁶ “Launch of the Mekong Dam Monitor,” US Embassy in Cambodia, 16 December 2020, <https://reurl.cc/WEekN5> ; “Mekong Water Data Initiative (MWDI),” Mekong-U.S. Partnership, <https://reurl.cc/qm9On0>

貳、湄公河流域水位及流量監測

「湄公大壩監測」計畫是在「湄公河-美國夥伴關係」的資金贊助下，由華府智庫史汀生研究中心（The Stimson Center）及環境顧問公司「地球之眼」（Eyes on Earth）合作執行，針對湄公河主流 13 處已完工的水壩及水庫，以及湄公河支流發電量超過 200 百萬瓦（MW）之 13 座水壩，每週定期更新其高解析度衛星影像，以及水庫營運之水位高度變化。該計畫亦針對中國在湄公河上游瀾滄江所設 11 處水壩之梯級水力發電廠，進行視覺化分析、模擬河川自然流量，並與泰國清盛（Chiang Saen）及寮國永珍（Vientiane）兩處水位測量計作比較。另並繪製湄公河流域地表溫濕度、雪量與降雨量分佈，監控流域內超過 500 處規劃中或已完工的水壩與水庫，並對湄公河下游四個關鍵區域進行高解析度影像及水文分析。⁷ 相關監測指標簡述如下：

一、由衛星影像推估河川水位變化

本計畫採用谷歌地球引擎（Google Earth Engine）利於分析大數據地理資料的雲端運算平台，下載自歐盟哥白尼地球觀測計畫之哨兵一號（Sentinel-1）及哨兵二號（Sentinel-2）衛星所取得影像。哨兵一號衛星因搭載合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar, SAR）系統，發射電磁波後，可穿透雲層覆蓋及接收地面回波，不受晝夜及雲量多寡的限制。而在哨兵一號衛星資料缺漏或品質不佳時，則以搭載多光譜影像儀（Multi-spectral instrument, MSI）之哨兵二號衛星取得補助影像，辨別水體後輸出至地理資訊系統軟體 ArcGIS，剔除被陰影遮蓋或照射角度不佳的河岸區段，以繪製出清晰的水庫沿岸線條。⁸

⁷ “Mekong Dam Monitor,” STIMSON Center, <https://reurl.cc/OX2pYA>

⁸ “Mekong Dam Monitor: Methods and Processes,” STIMSON Center, 10 December 2020, <https://reurl.cc/jqXk9L>

接下來則將水庫沿岸線條套疊至日本宇宙航空研究開發機構 (JAXA) 利用 ALOS 衛星所建構之 30 公尺解析度全球數值高程資料，並將資料網格化 (rasterization) 後，以中值濾波演算法 (median filter) 去除雜訊，得出現階段觀察期內估算之平均海拔數值，並與過往估算數值進行比對，以推估出正常運營情況下水庫水位之最大與最小值。⁹ 最後則分別取上述數值與每日實際觀測的水庫和河流水位進行校正，例如寮國南康二號水壩 (Nam Khan 2)，該水壩因位處湄公河中游的山區，而被選定為校正參考基準 (圖 1)。

10

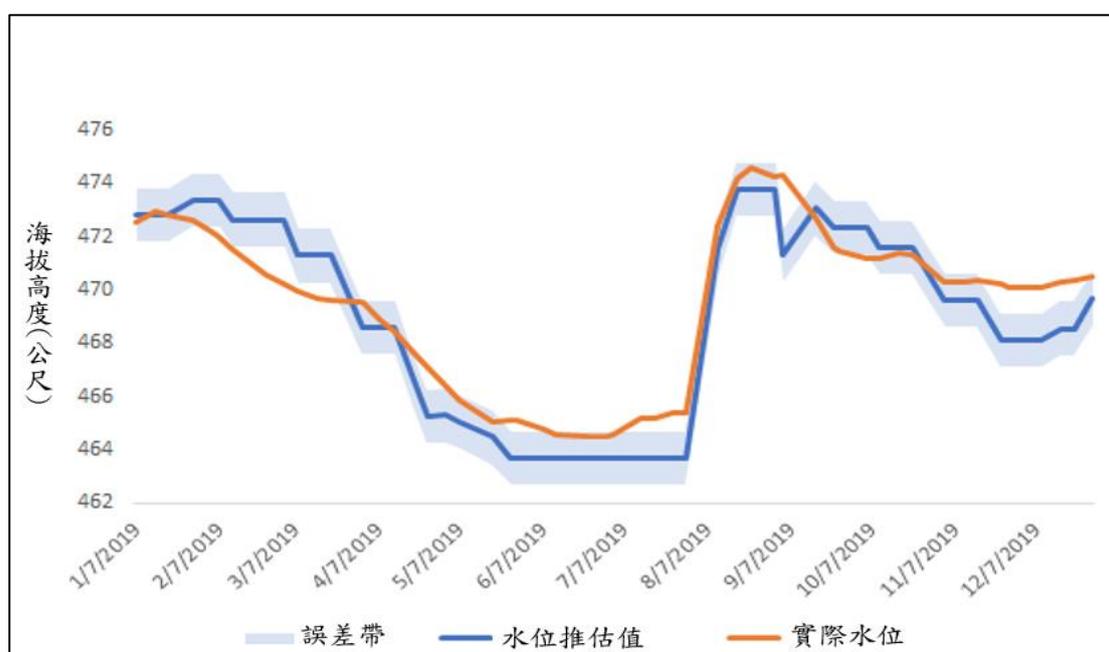


圖 1、2019 年寮國南康二號水壩水位變化

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹¹

另一個校正基準案例位於泰國清盛，從圖 2 中可看到推測值與實際觀測數值相似的水位變化，顯示出此衛星監測方式亦適用於推估附近沒有水壩或水庫的河段水位。¹²

⁹ As note 8.

¹⁰ As note 8.

¹¹ As note 8.

¹² As note 8.

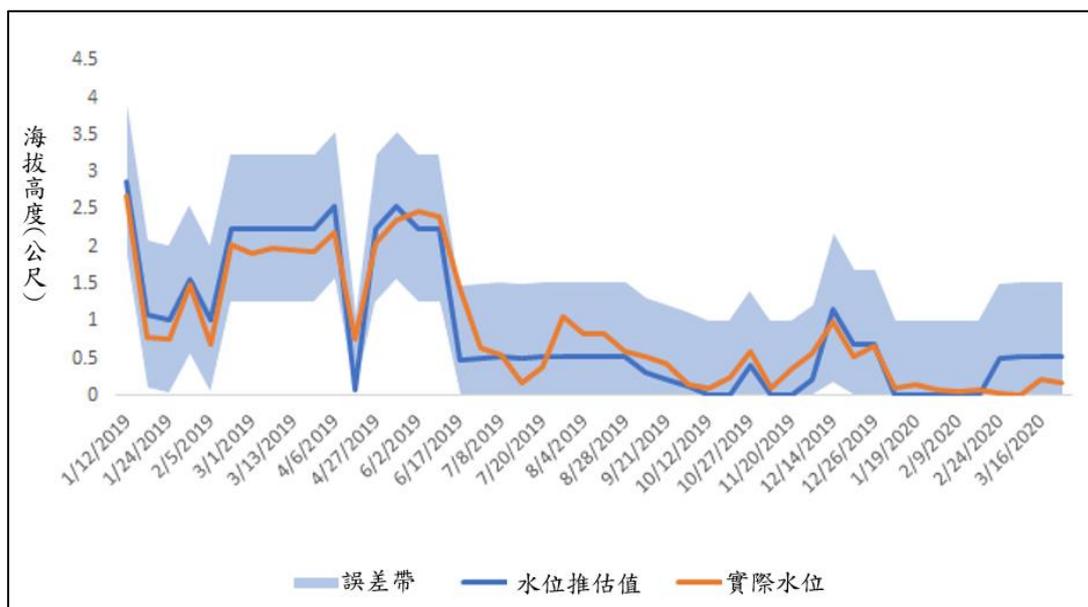


圖 2、2019 年至 2020 年 3 月中旬泰國清盛河段水位變化

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹³

二、監測瀾滄江梯級水力發電廠之流量變化

湄公河流域濕季約為 6 月至 11 月，乾季則在 12 月至隔年 5 月。然而濕季期間水量卻被大量限制停留在上游瀾滄江區段，進行水力發電以滿足中國東部省分用電需求，而下游柬埔寨、越南等國家則面臨缺水的窘境。反之在乾季期間，上游水庫經常無預警放水，造成下游洪患。

為探究中國於湄公河上游瀾滄江建設之梯級水力發電廠流量，監測計畫結合烏弄龍至景洪之 11 座水庫之水位推估值、泰國清盛河段所量測之實際水位值及模擬流量，視覺化後作成一剖面圖，並將每週或每月各水庫之推估水位海拔高度，與過去同時期資料作比較。若水位偏高，則判定為河川流量減少，並將箭頭標示為黃色；若水位偏低，則判定為河川流量增加，並將箭頭標示為綠色；若水位長時間處於滿水狀態或維持相同水位，則判定為正常流量。¹⁴

¹³ As note 8.

¹⁴ As note 8.

以此方式可得知 2020 年 7 月濕季期間，瀾滄江梯級水庫 11 處中 7 處放流量較正常偏低（黃色及紅色箭頭處），其中小灣及糯札度水庫 2 處因作為主要控制據點，放流量甚至降到最低（圖 3）。¹⁵

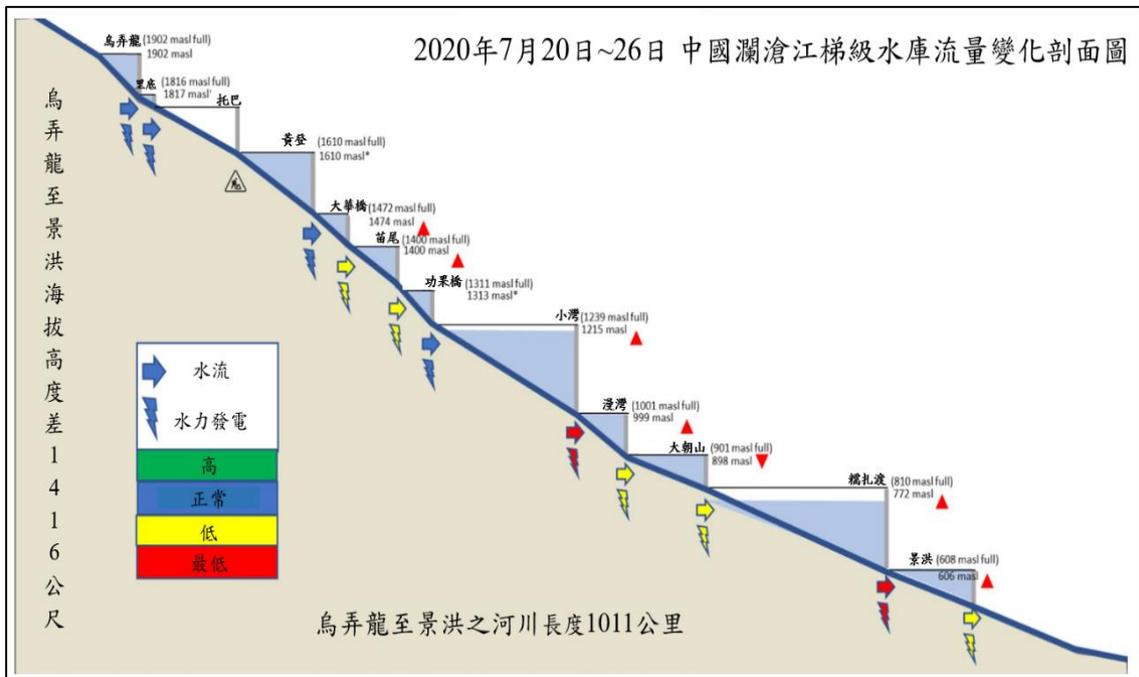


圖 3、2020 年 7 月 20 ~26 日中國瀾滄江梯級水庫流量變化圖

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹⁶

而在上游水庫攔截水源、限制流量以蓄水的同時，下游卻飽受旱災之苦，圖 4 即顯示柬埔寨境內、東南亞最大淡水湖的洞里薩湖（Tonle Sap Lake）水位近五年即呈現濕季偏低的變化，且整體水位有逐年遞減的趨勢，尤以 2019 年及 2020 年最為明顯，例如 2020 年 9 月期間湖泊水位（橘線）較往年明顯低落。比對湄公河計畫監測網站公佈之 2017 年 9 月 21 日及 23 日衛星影像，可看到該地區過往被湖水淹蓋區域正歷經大面積乾旱，衝擊沿岸漁村之稻種與捕魚生計（圖 5）。

¹⁵ Mekong Dam Monitor lifts the veil on basin-wide dam operations, STIMSON Center, 14 December 2020, <https://reurl.cc/Q71Ly9>

¹⁶ As note 8.

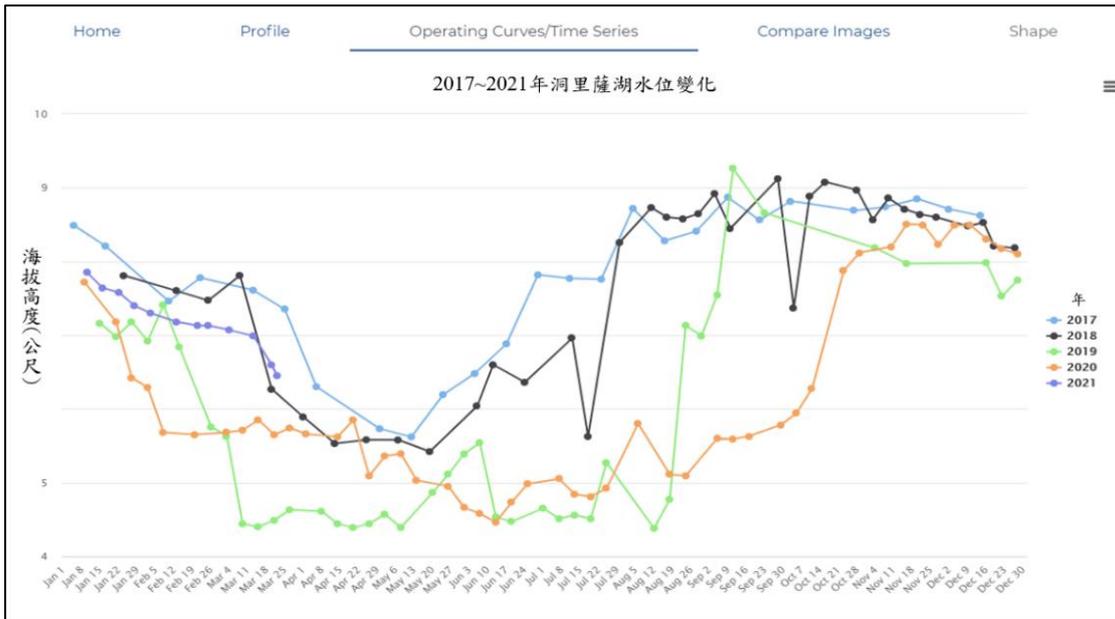


圖 4、2017 至 2021 年 3 月柬埔寨洞里薩湖水位變化

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹⁷

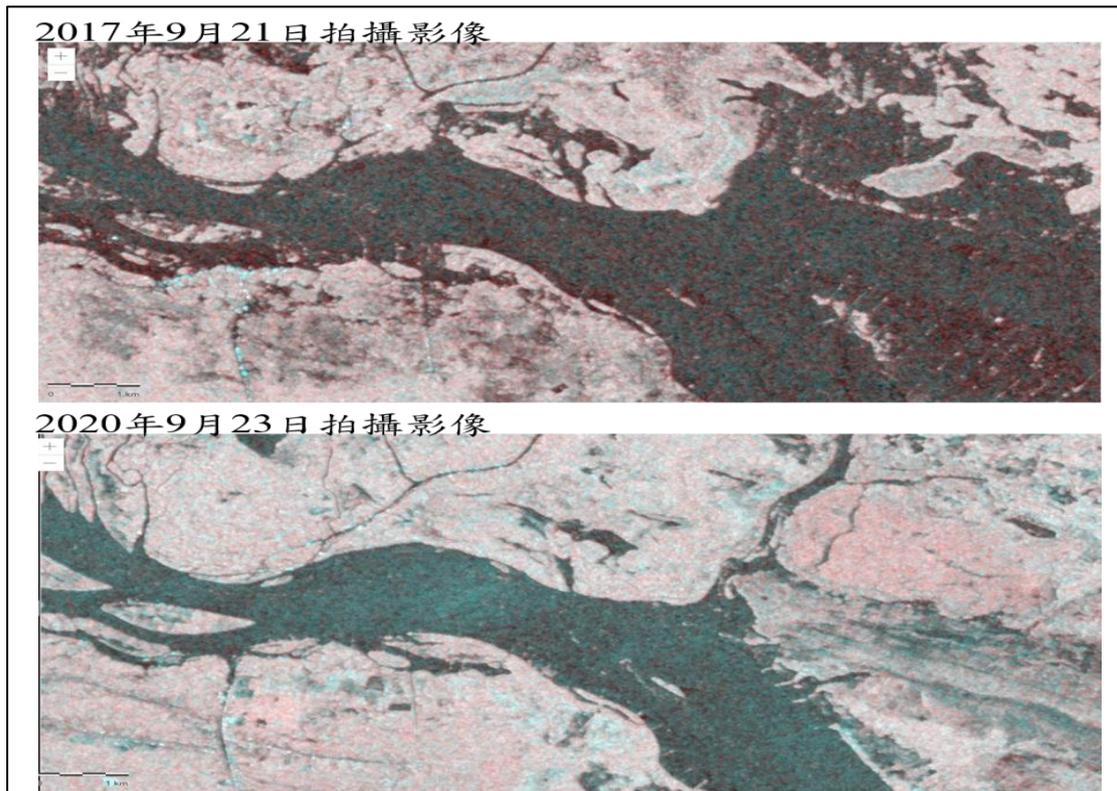


圖 5、2017 年 9 月與 2020 年 9 月洞里薩湖衛星影像對照

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站¹⁸

¹⁷ As note 7.

¹⁸ As note 7.

參、湄公河流域氣候因子監測及水利工程紀錄

一、以國防氣象衛星微波成像器推估溫溼度、降雨與積雪覆蓋變異

為全面掌握影響湄公河流域農漁業的氣候變化因子，以提供農耕業者及水利局參考，監測計畫亦納入地表溫度、地表濕度、降雨與積雪覆蓋變異等數項指標。地表溫度資料取自美國國防氣象衛星計畫（Defense Meteorological Satellites Program, DMSP）透過搭載特殊感應微波成像器（Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I）衛星所量測之氣候數據記錄（Climate Data Record），並剔除受水體區域受地面水氣影響而被低估的地表輻射率偏差值，以 1992 年至 2018 年的長期溫度變化趨勢作為基期，每週繪製出流域之地表溫度異常圖。¹⁹

此外，地表濕度及積雪覆蓋亦取自國防氣象衛星微波偵測資料，再以電腦運算得出水體面積，或搭配濾波器接收並辨別冰雪所反射之微波，以偵測上游區域的積雪面積與冰川融化情形。²⁰ 降雨資料則取自美國太空總署及日本 JAXA 合作之全球降水觀測計畫（Global Precipitation Measurement, GPM）每月觀測值，並與 2000 年至今的降雨量中位數做比較，繪製降雨量變異分布圖（圖 6）。²¹

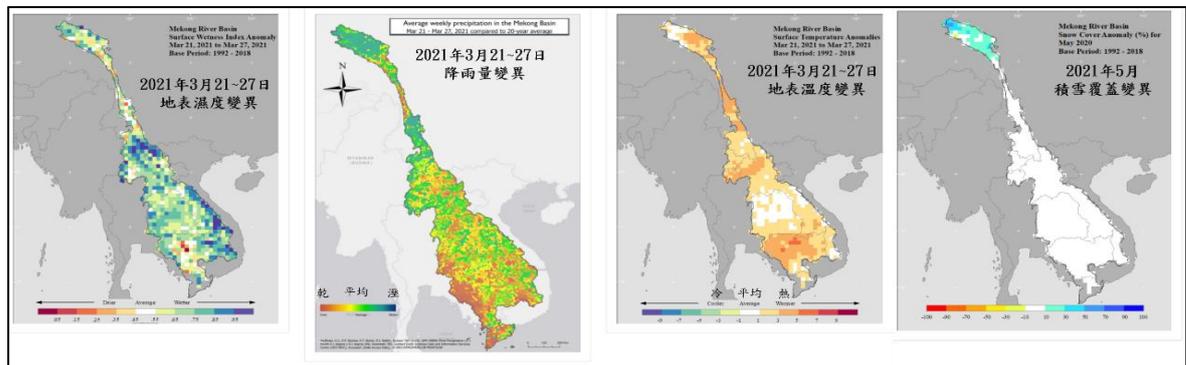


圖 6、湄公河流域地表濕度、降雨量、地表溫度和積雪覆蓋變異

¹⁹ As note 8.

²⁰ As note 8.

²¹ As note 8.

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站²²

二、系統性紀錄流域內各國水利工程進度

除了掌握湄公河流域內各項氣候因子變異外，監測計畫亦紀錄流域內逾 500 處規劃中或已完工的水壩與水庫資訊，項目包含庫址所在地、發電量、完工年份、建案數量、出資國家、貸款銀行、營建與供應商等，定期更新相關新聞報導連結，以利使用者查詢（圖 7）。²³

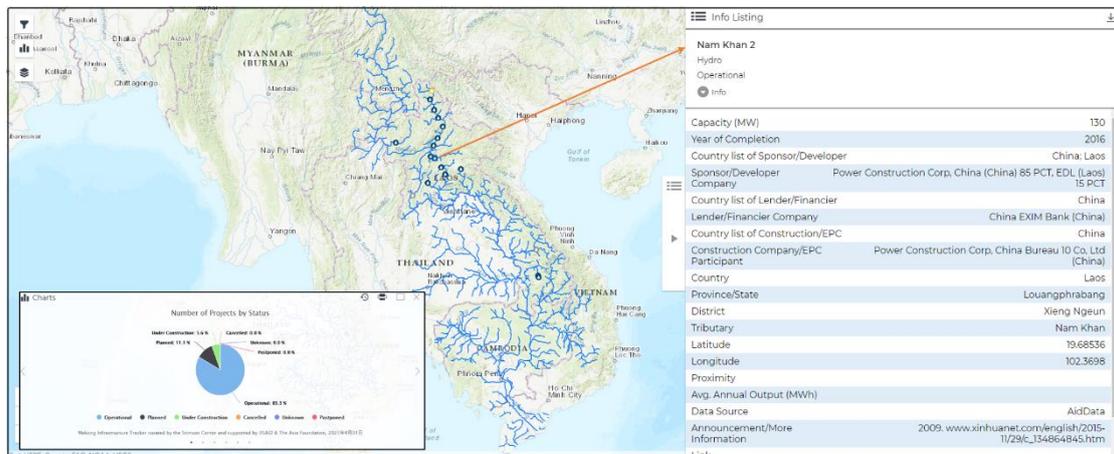


圖 7、寮國南康二號水壩位置及建造資訊

資料來源：史汀生研究中心「湄公大壩監測」網站²⁴

肆、結語

透過衛星遙測技術及地理資訊系統的整合與應用，湄公河流域水資源利用情形得以被透明化，也進而影響地緣政治的權力分配。而湄公河大壩監測計畫藉由開放資料的能量，亦即將水庫監測水位、流域全體之溫度、溼度、降雨與積雪覆蓋變異作成公開資訊發佈，則能使相關利益關係人，包含農漁業者、流域周邊社區清楚檢視上游至下游的水資源分布，並能提前預防乾旱與洪患事件，或將損害風險降低。

²² As note 8.

²³ As note 8.

²⁴ As note 7.

湄公河流域水文監測之資訊揭露，亦提供客觀且有力的數據佐證，使長期無法獲得合理水資源分配、抗爭力量有限的下游國家，得以對坐擁上游流域、占有豐沛發電水量及地理優勢的中國，進行有效的輿論施壓。例如湄公河監測計畫於 2020 年 12 月 15 日開始運作後，即偵測出 12 月 31 日起至 2021 年 1 月 4 日之間，泰國清盛、緬甸與寮國接壤的金三角地區，水位即無預警顯著下降超過 1 公尺，然對照同時間上游中國境內瀾滄江梯級水力發電廠之景洪壩，卻正進行蓄水，且中方並未在第一時間將攔壩蓄水之訊息通知下游國家。²⁵而在該事件被國際媒體報導後，中方迫於輿論才在 1 月 5 日發出聲明，將 1 月 5 日至 24 日擬蓄水的措施，告知泰國、緬甸、寮國及越南所組成的湄公河委員會。²⁶此顯示出湄公河流域之衛星和遙測技術應用範例，有助於達成區域資源平衡分配、減少人為因素引起之旱澇災損程度，值得作為其他地區跨界流域治理的參考：例如北韓於臨津江（Imjin river）上游築壩影響下游南韓之蓄水量，以及多次無預警洩洪，造成下游南韓人員傷亡事件。²⁷此即可藉由類似湄公河監測計畫之模式，有效掌握整體流域水資源變化、提前作好疏散或抗旱措施，以降低區域衝突或軍事摩擦的可能性。

本文作者劉翎端為英國劍橋大學環境、社會與發展碩士，以及倫敦政治經濟學院社會與發展碩士，現為財團法人國防安全研究院國家安全研究所政策分析員。

²⁵ China Belatedly Notifies Mekong Nations of River Disruption, *The Diplomat*, 8 January 2021, <https://reurl.cc/ZQRAD6>

²⁶ As note 25.

²⁷ Kim D, Lee H, Jung HC, Hwang E, Hossain F, Bonnema M, Kang D-H, Getirana A. Monitoring River Basin Development and Variation in Water Resources in Transboundary Imjin River in North and South Korea Using Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2020; 12(1):195. <https://doi.org/10.3390/rs12010195>

Satellite and Remote Sensing Technology in Transboundary Water Governance: the Case of the Mekong Dam Monitor

Linda Liu

Policy Analyst

Abstract

In September 2020, the US State Department, together with five ASEAN countries, namely, Thailand, Vietnam, Myanmar, Cambodia, and Laos, launched the "Mekong-US Partnership" to continue and expand the "Lower Mekong Initiative" (LMI) that was implemented from 2009 to 2020. The Partnership is intended to enhance water and natural resources management in the Mekong River Basin, promoting regional economic development and social security, thereby consolidating the power of the United States in Indochina and the Indo-Pacific region. This is mainly a response to the fact that China has built multiple dams and hydroelectric power plants on the Lancang River on the upper Mekong in recent years, which has greatly changed the ecology of the river, causing water resource disparity in the region.

China's unwillingness to share transparent water management information has not only impacted agricultural and aquacultural industries downstream, but increased drought and flooding risks for the riverine communities. Thus, the first priority for the US and member states in the Mekong-US Partnership is to improve the use of water resources in the Mekong River Basin. On December 15, 2020, the "Mekong Dam Monitor" project was thus launched; through the application of satellite images, remote sensing technology and Geographic Information System (GIS), the project will serve as a powerful tool to disclose the hydrological information of the entire basin.

The article examines the case of the "Mekong Dam Monitor" project and the effectiveness of satellite and remote sensing technology in the governance of transboundary river basins, as well as the benefits they can contribute to regional geopolitics and power balance.

Keywords: Mekong Dam Monitor, Satellite Image, Open Data, Geographic Information System (GIS)