

應用遙測技術於木瓜溪堰塞湖形成偵測

林恩如^{1,*} 林駿恩² 鍾曉瑋³ 林曉萱⁴ 陳國威⁵ 陳振宇⁶

^{1,*}農村發展與水土保持署減災監測組聘用副研究員 (通訊作者e-mail: lenju11@mail.ardswc.gov.tw)

²農村發展與水土保持署減災監測組聘用研究員

³鉅星數位科技股份有限公司經理

⁴農村發展與水土保持署減災監測組副工程司

⁵農村發展與水土保持署減災監測組科長

⁶農村發展與水土保持署減災監測組組長

摘要

2024年4月3日花蓮縣發生規模7.2強震，造成花蓮縣、宜蘭縣、南投縣等震度5強以上地區發生多處崩塌，並於4月22日發現木瓜溪上游因邊坡崩塌形成堰塞湖。因震後餘震頻繁影響下，無法進行現場調查，且氣象預報花東地區多雲有雨狀況下，難以判斷堰塞湖形成時間點。本研究利用衛星影像計算NDWI指標以判釋河道水體變異程度，藉以偵測堰塞湖之蓄水範圍，再配合雷達影像之回波強度分析，透過不同影像取得時間加以分析，以評估堰塞湖形成時間點，本方法可有效偵測水體範圍，期可作為相關單位防災應變時偵測堰塞湖形成之參據。

關鍵字：堰塞湖、水體偵測、NDWI、雷達回波強度

一、前言

堰塞湖形成主要受降雨及地震影響下，山區邊坡崩塌產生大量土體阻塞河道並形成堰塞湖 (Peng & Zhang, 2012; 陳昆廷, 2010; Costa & Schuster, 1988; Schuster & Costa, 1986)，再者，Costa and Schuster (1988) 研究指出，堰塞湖通於形成後約一天內即潰決約佔 27%，而存在時間約一星期約佔 40%、超過一年以上者約佔 15% 左右。陳昆廷等人 (2010) 統計莫拉克期間所形成之堰塞湖，約九成於一星期內潰決。考量不同誘發因素，受地震誘發所形成之天然壩，其堰塞湖體積較降雨誘發形成之堰塞湖壩體體積大 (郭玉樹等, 2012)。過往學者研究結果，不管是降雨或地震誘發之堰塞湖其存在時間不長，常於短時間內即產生潰決破壞，其中於地震誘發之堰塞湖若鄰近山區聚落處，後續潰決造成之危害將遠大於降雨誘發之堰塞湖。因此，如何於地震後判斷是否形成堰塞湖，將有助於主管機關於防災應變中心開設時之情資蒐整。

二、研究方法與材料

在應變期間首重情資蒐集，以協助災情研判及提供應變決策參據，而其資料來源及資訊彙整更是重要基礎工作，為掌握災情的即時性，故獲取第一手即時衛星影像時間點及災區判釋資

料，對於應變輪值期間災情彙整作業，俾供研判受災層面與應變策略極為重要。在地震發生後，可能因交通中斷影響無法調查受災區域之影響範圍，因此衛星影像即為第一手獲取災區情資來源之一，係以在災害發生初期，藉衛星影像分析判釋，可定時蒐集大面積災區資料，提供時、空間之地表特徵變化資訊。

2.1 木瓜溪堰塞湖

依據 4 月 22 日的林業新聞，因受 0403 強震影響導致邊坡崩塌，造成堵塞已有深潭跡象，林業及自然保育署花蓮分署追蹤後發現，4 月 19 日時已形成堰塞湖，湖面面積約 5.6 公頃、壩高約 30 公尺、迴水長度約 700 公尺，蓄積水量約 43 萬立方公尺 (林保署, 20240422)。



圖 1 木瓜溪堰塞湖照片 (來源：林保署)

2.1 Sentinel-1 雷達衛星影像

Sentinel-1 為軌道高度 693 公里的太陽同步衛星，其觀測模式分為 Interferometric Wide Swath Mode、Wave Mode、Strip Map Mode 及 Extra Wide Swath Mode，其為 C 波段，波長為 5.6 公分，空間解析度為 5x5m、5x20m、25x100m 等，再訪週期為 6 或 12 天，像幅度 80 至 400 公里不等，入射角為 20 至 47 度不等。

鑑於堰塞湖之形成受到降雨或地震為主要成因，於降雨期間因受雲覆遮蔽影響，僅使用光學影像則無法有效偵測堰塞湖之形成，若搭配使用不受雲覆遮蔽影響之雷達影像，將有助於偵測堰塞湖之形成。過往研究指出 Sentinel-1 雷達影像對於偵測水體是相當合適的工具 (Gulácsi and Kovács, 2020; Twele et al., 2016)。因此，本研究運用農村水保署所建立以 Sentinel-1 雷達影像自動偵測堰塞湖模組 (農村水保署，2023)，進行堰塞湖形成偵測，其偵測方法分為 1. 影像前處理；2. 時間序列影像正規化及統計值計算；3. 變異偵測；4. 地形分析。在判釋上，以「最小值門檻法」與「統計值門檻法」兩種方法來偵測堰塞湖，兩者以 2015 年 7 月至 2020 年 7 月五年間影像資訊統計為基礎，前者以統計期間之 DN 值最小值作為門檻，萃取判釋影像像元 DN 值小於門檻之像元；後者以統計期間影像統計結果為基礎，求取平均值與標準差，萃取影像 DN 值小於兩倍標準差以下作為門檻 (圖 1)，再依據山坡地範圍、河道、總通量大於 4、坡度小於 30 度、非已知水庫等水體、非雷達陰影區等條件進行篩選 (農村水保署，2023)。

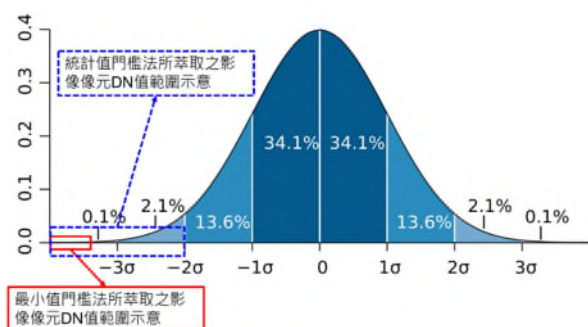


圖 1 不同門檻值選定法之像元值示意圖

2.2 Sentinel-2 光學衛星影像

除使用雷達影像外，主要是利用 Sentinel-2 光學影像具有較佳地面解析度，若判釋目標於無雲覆干擾下，對於地表具較好分析能力，用以輔助判釋雷達影像偵測成果。本文使用 BigGIS 平台之 Sentinel 2 開放衛星影像資料，其擁有

13 個波段並具有 10 至 60 公尺空間解析度 (表 1)。此外，Sentinel-2 所具有之波段配合 Normalised Difference Water Index (NDWI) 指標，則可以用來判別開放水體 (water body) 並利用指標值強化水體於影像之特徵。

目前在 NDWI 指標計算上可分為兩種，其一是偵測植被含水量改變 (Geo, 1996)，另一是偵測水體含水量改變 (McFeeters, 1996)，本研究採用 McFeeter (1996) 所定義之 NDWI 指標，其較符合本文堰塞湖蓄積水體變化之偵測。依據 McFeeters (1996) 所定義 NDWI 計算公式如式 (1) 所示，其中 Sentinel 2 所使用之頻譜波段則依 EOS DATA ANALYTIC 說明 NIR 使用 B8 及 Green 使用 B3 光譜波段進行 NDWI 指標運算。

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (1)$$

上述式 (1) 所對應之 NDWI 值如下表 2 所示，其使用，0.2 至 1 間為水體表面 (Water surface)、0.0 至 0.2 間為洪水或潮溼 (Flooding, humidity)、-0.3 至 0.0 間為可能乾旱或非水體表面 (Moderate drought, non-aqueous surfaces)、-1 至 -0.3 間為乾旱或非水體表面 (Drought, non-aqueous surfaces)。應用衛星影像 NDIW 指標分析水體含水量方式，可作為交通道路中斷無法現地勘查時之替代方案，針對堰塞湖形成前後影像，分析河道水體面積變化。

表 1 Sentienl-2 衛星影像波段表

Band	Resolution (m)	Central Wavelength (m)
B1	60	443
B2	10	490
B3	10	560
B4	10	665
B5	20	705
B6	20	740
B7	20	783
B8	10	842
B8A	20	865
B9	60	940
B10	60	1375
B11	20	1610
B12	20	2190

Source: <https://eos.com/find-satellite/sentinel-2/>

表 2 Sentienl-2 NDWI 指數對應表

NDWI	Feature	Reference
0.2 - 1.0	Water surface	EOS Data Analytics
0.0 - 0.2	Flooding, humidity	
-0.3 - 0.0	Moderate drought, non-aqueous surfaces	

-1.0 - 0.3	Drought, non-aqueous surfaces	McFeeters (2013)
< 0.3	Non-Water	
>= 0.3	Water	
<= 0	Non-Water	McFeeters (1996)
> 0	Water	

三、成果與討論

3.1 Sentinel 影像資料

本研究使用 2024 年 4 月至 5 月期間 Sentinel-2 衛星影像進行 NDWI 計算，可取得影像共計 6 張，如圖 2 所示，其中 4 月 9 日、4 月 19 日及 4 月 24 日之雲覆率介於 58% 至 93%，且於堰塞湖範圍受到雲蔽過高無法計算 NDWI，僅 4 月 4 日、4 月 14 日、4 月 29 日之影像可用。

另外，為解析於雲覆率過高期間堰塞湖是否形成，蒐尋地震前後之 Sentinel-1 雷達影像，分別利用地震前 3 月 27 日、地震後 4 月 8 日及 4 月 20 日之影像資料來偵測水體生成時間。

3.2 木瓜溪堰塞湖水體偵測成果

利用各期 Sentinel-2 影像配合 NDWI 指標計算，三時期之水體偵測成果如圖 3 至圖 5 所示。由判釋之成果可以看出，於 2024 年 4 月 4 日之 NDWI 圖，其屬於水體之 NDWI 判釋值介於 0 至 0.044 間；於 4 月 14 日成果圖，其屬於水體之 NDWI 判釋值介於 0 至 0.106 間；於 4 月 29 日成果圖，其屬於水體之 NDWI 判釋值介於 0 至 0.144 間。由此三張 NDWI 判釋之可以看出，當判釋區域內水體較少時，其 NDWI 值較小，反之亦然。此外，配合雷達影像之判釋成果，於災前 3 月 27 日雷達影並無偵測到水體訊號，於 4 月 8 日雷達影像則偵測到有水體生成訊號，於 4 月 20 日則是明顯判釋堰塞湖已大量蓄水，推測木瓜溪堰塞湖形成時間約介於 4 月 7 日之 4 月 11 日之間。

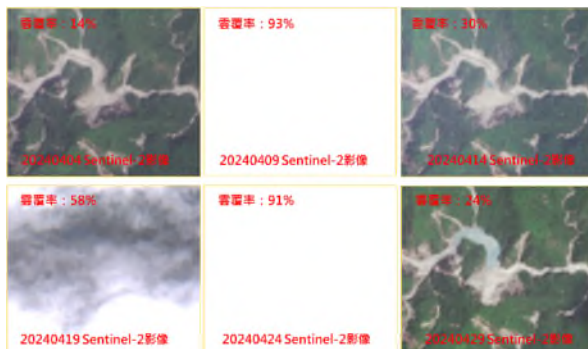


圖 2 研究區域 Sentinel-2 影像及各別雲覆率圖

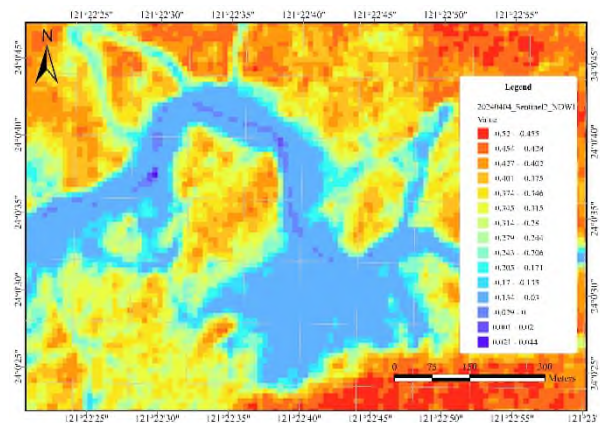


圖 3 20240404-NDWI 圖

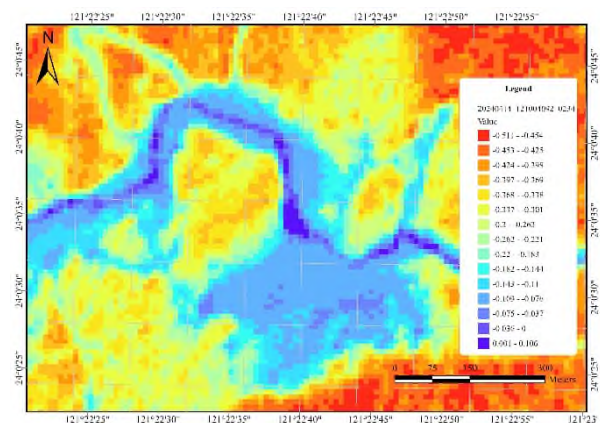


圖 4 20240414-NDWI 圖

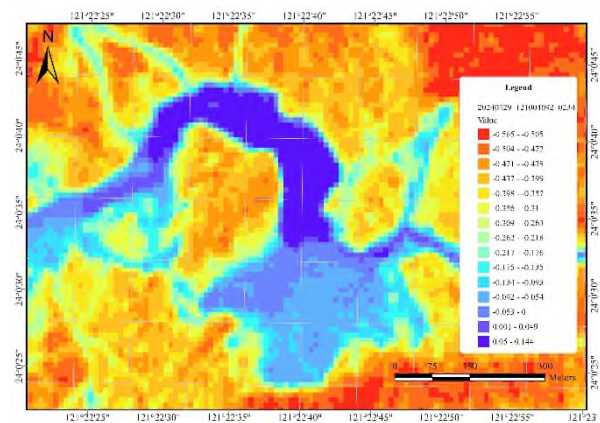


圖 5 20240429-NDWI 圖



圖 6 木瓜溪堰塞湖水體偵測雷達影像圖

四、結論與建議

本研究以 0403 花蓮地震造成花蓮木瓜溪上游形成之堰塞湖為標的，藉由光學影像之 NDWI 指標及雷達影像之回波強度分析，綜合判斷是否產生堰塞湖，相關結論如下。

1. 山區邊坡受到強震影響，崩塌土砂產生粉塵影響，且災區雲覆率過高，造成震後初期衛星影像品質不佳，不利判釋作業。
2. 在 4 月餘震不斷及部分交通中斷影響下，無法於第一時間取得堰塞湖形成資訊。
3. 使用光學與雷達衛星影像判別災後是否有堰塞湖形成，其具有長時間及大範圍監測，可進行地表變異監測。
4. 本研究透過不同影像來源及取得時間，分別利用 NDWI 及回波強度分析，可有效推測堰塞湖形成時間及水體範圍。

由於堰塞湖存在時間具高度不確定性，一旦發現必須盡早提供相關堰塞湖調查評估資料，以供防災單位擬定防災應變決策。透過本研究應用遙測技術偵測堰塞湖形成方法，將能在第一時間分析是否形成堰塞湖、水體範圍及蓄水高度等重要資料，有助於提升緊急應變之情資蒐整。但由於 Sentinel-1 及 2 衛星影像需透過輻射校正與地形校正之前處理作業後才可供分析使用，對於分秒必爭的防災應變上，如何快速發布大範圍監測判釋成果，建議後續防災單位可建立前處理資料集平台，以縮短分析時間，將有利於應變開設時的災害資訊提供。

參考文獻

1. COSTA, J. E., & SCHUSTER, R. L. (1988). "The formation and failure of natural dams." *GSA Bulletin*, 100(7), 1054–1068.
2. Gao, B. (1996). "NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space." *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
3. Gulácsi, A., & Kovács, F. (2020). "Sentinel-1-Imagery-Based High-Resolution Water Cover Detection on Wetlands, Aided by Google Earth Engine." *Remote Sensing*, 12(10), Article 10.
4. McFEETERS, S. K. (1996). "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features." *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.
5. McFeeters, S. K. (2013). "Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a Geographic Information System to Detect Swimming Pools for Mosquito Abatement: A Practical Approach." *Remote Sensing*, 5(7), Article 7.
6. Ogilvie, A., Belaud, G., Massuel, S., Mulligan, M., Le Goulven, P., & Calvez, R. (2018). "Surface water monitoring in small water bodies: Potential and limits of multi-sensor Landsat time series." *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 4349–4380.
7. Peng, M., & Zhang, L. M. (2012). "Breaching parameters of landslide dams." *Landslides*, 9(1), 13–31.
8. Schuster, R. L., & Costa, J. E. (1986). "A Perspective on Landslide Dams."
9. Sun, F., Sun, W., Chen, J., & Gong, P. (2012). "Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery." *International Journal of Remote Sensing*, 33(21), 6854–6875.
10. Twele, A., W. Cao, S. Plank & S. Martinis (2016). "Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain." *International Journal of Remote Sensing*, 37, 2990–3004.
11. Xu, H. (2006). "Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery." *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3025–3033.
12. 林業及自然保育署 (2024)，「花蓮地震後木瓜溪上游新增堰塞湖 林保署花蓮分署成立應變機制」，林業新聞。網址：<https://www.forest.gov.tw/0004547/0073543> (檢視日期：2024/04/30)
13. 郭玉樹, 邱盛彥, 陳昆廷, 謝正倫 (2012)，「台灣地區地震及降雨引致崩塌形成堰塞湖之壩體形狀分析」，*中華防災學刊*, 4(2), 143 – 152.
14. 陳昆廷, 臧運忠, 郭玉樹, 呂明鴻, 謝正倫 (2010)，「莫拉克颱風引致堰塞湖之案例分析」，*中華防災學刊*, 2(1), 43 – 50.
15. 農村發展及水土保持署 (2023)，「112 年多元遙測影像整合建置與加值服務應用計畫」。