

PSInSAR 技術監測臺灣乾旱與地層下陷相關性之研究

張耘僑¹ 曾國欣^{2*} 戴于恒³

摘要

臺灣西部平原長期依賴地下水，加上氣候變遷造成的降雨不均與乾旱，易引發地層下陷。2021 與 2023 年嚴重乾旱更使沉陷情形加劇。本研究運用永久散射體干涉合成孔徑雷達技術(PSInSAR)，分析 2019-2023 年 Sentinel-1 影像，並結合降雨資料，探討乾旱對下陷速率的影響。結果顯示，乾旱期降水量大幅減少，與沉陷速率高度相關，最嚴重地區乾季下陷速率達 7.8 cm/year。為驗證結果，引入 GNSS 站點進行多重參考點克利金內插校正，並以獨立站比對，相關係數達 0.98；另與水利署公告之顯著下陷面積比較，差異約 $\pm 10\%$ 。顯示 PSInSAR 在監測細部地表形變具良好精度與穩定性，未來可作為水資源管理及地層下陷防治之重要依據。

關鍵詞：永久散射體干涉合成孔徑雷達差分干涉、地層下陷、降水

1. 前言

1.1 研究動機及目的

地層下陷是全球多國面臨的重要課題，例如美國加州聖華金谷(San Joaquin Valley)、伊朗德黑蘭西南部平原、越南湄公河流域、墨西哥 Aguascalientes 谷地及印尼雅加達等地區皆有相關案例(Mahmoudpour *et al.*, 2016、Minderhoud *et al.*, 2017、Cigna & Tapete, 2021、Tzampoglou *et al.*, 2023)。在臺灣，地層下陷現象同樣廣泛存在，尤以雲林、嘉義及屏東地區最為顯著。主要成因來自於人為活動，其中過度抽取地下水是最關鍵的因素，造成含水層之水壓降低，在支撐力不足的情況下導致結構鬆動與壓密現象。為了減緩地層下陷問題，我國政府自民國 84 年(1995 年)起，陸續推動第一期(1995 – 2000)與第二期地層下陷防治執行方案(2001 – 2008)，針對宜蘭、彰化、雲林、嘉義、臺南、高雄及屏東等地區進行管理，對於減少全臺顯著下陷面積已頗具成效。隨後於民國 109 年(2020 年)推動第三期地下水保育管理暨地層下陷防治計畫(2021 – 2024)，進

一步整合地下水保育、監測預警、抽水管理與地下水補注等策略，以持續減緩地層下陷並防止海水入侵(節錄自水利署 2023 年統計書刊)。

然而在 2021 年初，臺灣西半部經歷了自 1947 年以來最嚴重的乾旱，此一「百年大旱」事件導致停耕面積與比例達近十年來最高(表 1)。此次乾旱與 2020 年梅雨季及颱風季降雨量異常偏低及短促有關，造成水庫蓄水量大幅下降，水資源供應面臨嚴峻挑戰。由於缺水情形嚴重，需水量大的西南部地區更加依賴地下水，使地層下陷控制難度顯著提高，政府原訂每年 3 cm 的沉陷速率控制目標亦面臨挑戰。此外，在 2023 年世界各地多處遭逢數十年來最嚴重的乾旱與氣溫異常上升，導致水資源缺乏至歷史新低(WMO, 2023)，同年在臺灣也有觀測到降雨異常，而呈現地層下陷幅度增加的情形。

為探討這兩次乾旱事件對地層下陷的潛在影響，本研究以雲林縣作為研究區域，在縣境內有為數不少的穩定結構體(如建物及農舍)，提供了適合雷達衛星觀測應用的條件，以進行長期地表變形監測。因此，本研究聚焦於乾旱前後地表變形的時空變化，量化 2019 – 2023 年乾旱期間降雨量與地層

¹ 國立中央大學土木工程學系 碩士生

² 國立中央大學土木工程學系 教授

³ 國立中央大學太空及遙測研究中心 助理工程師

* 通訊作者, E-mail: khtseng@csrsr.ncu.edu.tw

收到日期：民國 114 年 01 月 02 日

修改日期：民國 114 年 04 月 14 日

接受日期：民國 114 年 09 月 22 日

下陷的關係，並分析地表變形空間分布與速率變化。透過合成孔徑雷達衛星(Synthetic Aperture Radar, SAR)的永久散射體(Persistent Scatterer)差分干涉技術(Interferometry)(合稱 PSInSAR)，結合時序數據與地層下陷之關聯性進行探討，期望為未來的水資源管理、地下水使用策略及土地利用規劃提供科學依據，並減少地層下陷對環境與基礎設施的長期衝擊。

1.2 文獻回顧

臺灣西南部廊道以雲林面臨最嚴重的地層下陷問題 (Tung & Hu, 2012、Hsu *et al.*, 2015、Huang *et al.*, 2016、Ku & Liu, 2023)，尤其在民國 91 年地下水管制辦法發布前，該地區的下陷速率曾高達每年 10 cm (圖 1)。近年根據經濟部水利署公布的數據，雲林最嚴重的區域仍達到每年 6 至 7 cm，且多集中於元長鄉、土庫鎮與虎尾鎮等地區。前人研究亦指出，地層下陷與乾季期間的第一期稻作密切相關。由於秋冬降雨稀少，隔年初農民需大量抽取地下水以灌溉稻田，導致地層下陷進一步加劇 (Yang *et al.*, 2019、Chen *et al.*, 2023)。過去在全國尺度上，已有多項研究試圖統整臺灣地區的地層下陷分布特性，例如 Ching *et al.* (2011) 利用全臺水準測量與全球衛星導航系統 (GNSS) 連續站資料，推估 2000 至 2008 年間的垂直變形速率，並將其與區域造山運動及地下水變化趨勢進行連結。

以 InSAR 技術進行地表變形監測與分析逐漸受到廣泛運用，例如 Franklin & Huang (2022) 結合 InSAR 與 GNSS 資料，更新臺灣地區的地殼應變場與垂直變形場，進一步證實多元衛星融合資料在長期地表運動監測上的應用價值。Yang *et al.* (2019) 利用 Sentinel-1A InSAR 資料，分析雲林及彰化地區的季節性變形，並指出地層下陷高峰與乾季及低降雨量密切相關。Yeh *et al.* (2025) 則發展結合 GNSS 精密定位與 InSAR 資料的新方法，以提升資料融合的準確性，加強對長期地表變形的監測效能。傳統的地表變形監測方法，如水準測量與 GNSS 雖具備高精度且可提供垂直及平面等三維變形資訊，但受限於布設密度低、人力需求高、成本昂貴、測量週期長以及無法自動大範圍更新等問題 (仝云霄等, 2024)。此外，在環境變動劇烈的地區，基準點的長期穩定性亦難以維持。隨著合成孔徑雷達干涉技術 (InSAR) 近年快速發展，地表變形監測精度已可達毫米(mm)等級，且能以高空間解析度、低成本及無需地面控制點的方式，進行大範圍且高頻率的觀測 (Yusiyanti *et al.*, 2023)。其中，永久散射體雷達差分干涉技術(PSInSAR)，相較於傳統差分干涉方法，能更有效地克服同調性不足及大氣延遲等誤差問題，並針對穩定反射點提供高精度的長期形變時序結果，非常適合應用於大範圍地層下陷監測。

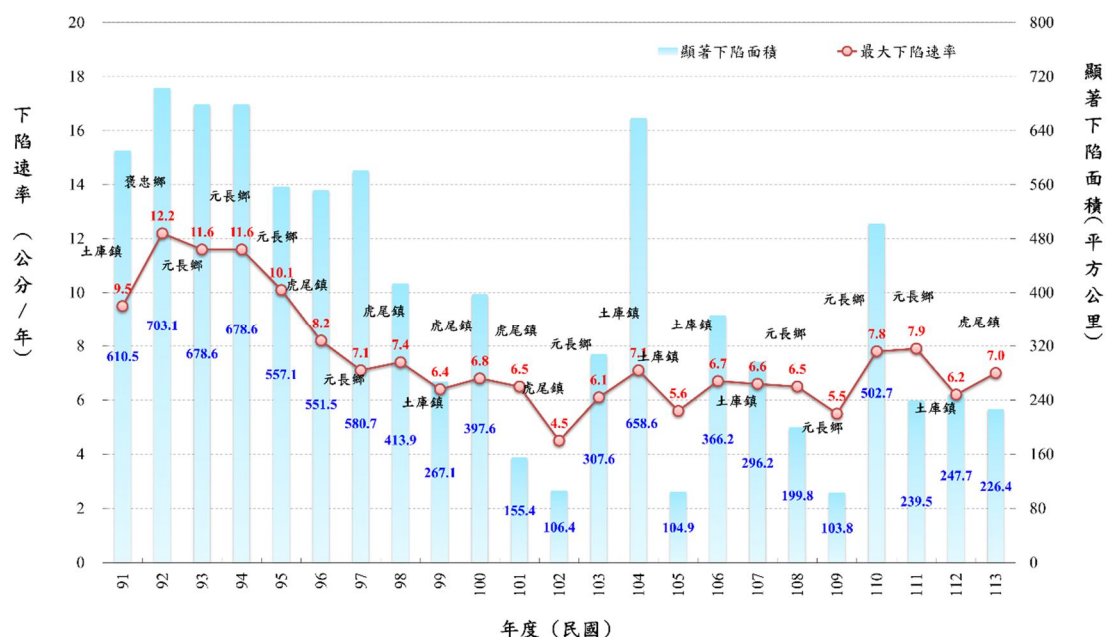


圖 1 雲林地區近年最大下陷速率 (資料來源：經濟部水利署，2025)

表 1 2014 至 2023 年全臺總計農田停灌面積 (資料來源：經濟部水利署，2025)

年分(民國/西元)	灌溉面積(公頃)	公告停灌面積 (公頃)	實際停灌面積 (公頃)	實際停灌占 灌溉面積百分比(%)
民國 103 年/2014	368,419	-	-	-
民國 104 年/2015	364,052	43,659	31,931	8.77
民國 105 年/2016	363,351	-	-	-
民國 106 年/2017	363,277	-	-	-
民國 107 年/2018	365,468	1,175	779	0.21
民國 108 年/2019	365,643	-	-	-
民國 109 年/2020	369,991	19,000	13,600	3.68
民國 110 年/2021	382,853	74,370	46,662	12.19
民國 111 年/2022	396,680	-	-	-
民國 112 年/2023	415,798	19,162	17,222	4.14

然而，目前針對乾旱事件與地層下陷之間的動態關係，相關文獻多著重於統計年均變化或特定區域下陷潛勢，較少有研究結合 PSInSAR 提供的時間序列變形結果與短期且極端的季節降雨資料進行綜合分析。因此，本研究嘗試彌補此一研究缺口，結合 2019 至 2023 年的衛星形變時序與雨量資料，探討 2021 及 2023 年乾旱事件對雲林地區地層下陷的影響，進一步建立極端氣候與地表變形之間的時空關聯性。

2. 研究資料與方法

2.1 研究資料

2.1.1 雨量資料

本研究雨量資料由交通部中央氣象署的 CODIS 平台取得(交通部中央氣象署，2025)，涵蓋的時間範圍為 2019 至 2023 年，可用於分析不同時期及年份的降雨，圖 2 綠色長條圖所標記的月份為本研究定義之乾季月份，即 12 月至隔年 5 月。這段時間為臺灣中南部縣市的乾季，降水量相對較少，此時間區間也同時是雲林地區第一期稻作的生長月份，表 2 則為各年份乾季的雨量總和，在百年大旱發生的 2021 年，其乾季雨量僅有 189 mm，大約為往年的三分之一，其次在 2023 的另一波乾旱事件，其降雨量約為往年的六成，故後續將討論這兩次事件相較於常年雨量所造成地表沉陷的差異性。

2.1.2 衛星影像資料

本研究使用的影像來自歐洲太空總署 (ESA) Sentinel-1A 衛星拍攝的雷達影像。該衛星搭載波長為 5.6 cm 的 C 波段合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)，具備穿透雲層、不受天氣影響的特性，時間解析度為 12 天。根據衛星運行方向，影像可分為由南向北運行的升軌(ascending)和由北向南運行的降軌(descending)。由於降軌影像在 2022 年 2 月至 7 月間因故障無法取得，因此本研究採用升軌影像。研究期間為 2019 年 10 月 8 日至 2023 年 8 月 24 日，共使用 110 張影像。

近年來，Sentinel-1 衛星已廣泛應用於全球多地的地層下陷監測研究。例如，Rateb & Abotalib (2020)結合 Sentinel-1 與 GPS 資料，探討尼羅河三角洲的地層下陷現象；Morishita (2021)則利用 LiCSAR 與 LiCSBAS 進行日本全國都市地區形變監測；Ramirez *et al.* (2022)應用 PS-InSAR 分析韓國唐津市因隧道工程引起的地表變形；Novellino *et al.* (2017)評估使用 Sentinel-1 製作英國地面形變全國圖資的可行性；而 Cian *et al.* (2019)利用 SNAP 與 StaMPS 的方法，應用於非洲沿海城市的地層下陷監測。這些研究顯示 Sentinel-1 提供大量且高品質的開源資料，在不同地區與應用情境下皆具備高度可行性與準確性。

表 2 乾季月雨量總和

時間	乾季累積雨量(mm)
2019/12-2020/05	576
2020/12-2021/05	189
2021/12-2022/05	543
2022/12-2023/05	337

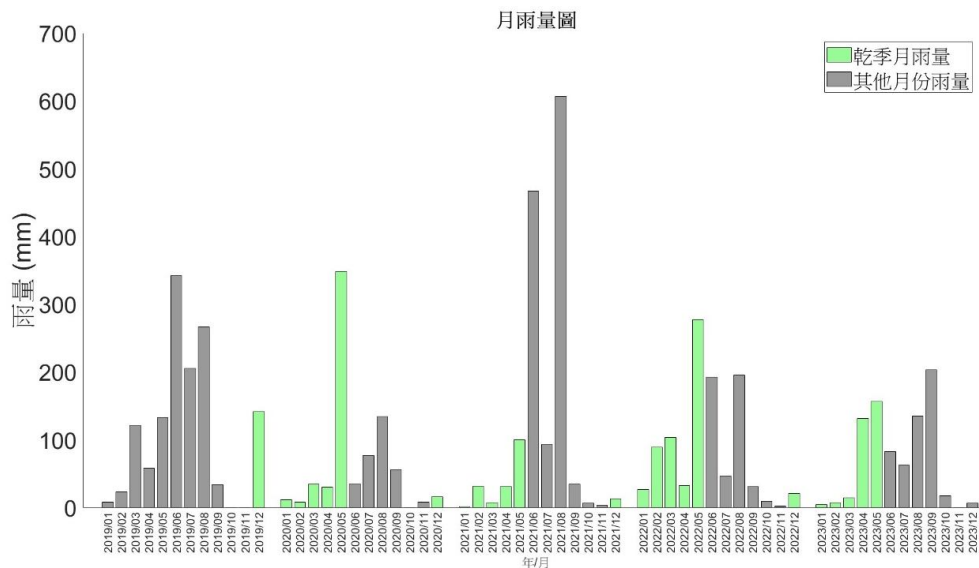


圖 2 2019 至 2023 年雲林月累積雨量圖，綠色長條為乾季期間(12 月至隔年 5 月)，灰色長條為其他月份雨量

2.1.3 GNSS 輔助資料

本研究使用雲林縣 20 個 GNSS 站作為驗證資料，其分布如圖 3 所示。這些 GNSS 站點能夠持續提供高精度的 E(東西)、N(南北)及 V(垂直)方向的位移數據，每日進行坐標解算，記錄地表的細微變動，為地層下陷的監測提供關鍵的參考數據。由於 GNSS 能達到毫米(mm)等級的測量精度，這些數據能夠準確反映地層的長期變化趨勢及局部的下陷情況。在本研究中，這些 GNSS 站點的資料將作為 PSInSAR 結果的約制與驗證使用。PSInSAR 技術雖然能夠大範圍監測地表變形，但其觀測屬於一維的視衛星方向(Line of Sight, LOS)距離改變量，且變形量為相對於單一不動點之相對變形，化算至特定基準之實際變形不明且難以進行工程面的解釋。因此需仰賴地面測站進行校驗，而 GNSS 連續站的資料不論在準確性和時效性上，都有助於提高 PSInSAR 的實用性。

2.2 研究方法

2.2.1 PSInSAR

PSInSAR(永久散射體合成孔徑雷達差分干涉)是一種利用合成孔徑雷達(SAR)影像來進行地表變形監測的技術(Ferretti *et al.*, 2001)。透過分析長時間序列的 SAR 影像，選擇一張主影像(master image)

與其他副影像(slave image)建立干涉對(圖 4)，並尋找地面上穩定且同調性高的目標物。這些穩定的目標物被稱為永久散射體(PS)。永久散射體通常是一些能夠提供穩定反射信號的物體或結構，如建築物、橋樑、角反射器等。這些結構在長時間的觀測中能保持穩定的反射強度，因此非常適合用來檢測地表與衛星重複軌道間的微小距離變化。

本研究的影像及 PSInSAR 處理可分為兩個主要階段，如圖 5 所示。第一階段為影像前處理，採用歐洲太空總署(ESA)提供的軟體 SNAP(Sentinel Application Platform)。該階段首先讀取多時期的 Sentinel-1 影像，接著選定主影像後進行配準與干涉處理，進一步產生干涉圖，並去除平地與地形效應，最終輸出可供 PSInSAR 處理的資料集。

在進入第二階段處理前，需先設定 Amplitude Dispersion Index(ADI) 的門檻值，以篩選潛在穩定散射點。ADI 是一項評估像素相位穩定性的指標，透過判斷一組影像序列中每個像素相較與整體像素的標準差穩定性，數值越低代表該點的相位越穩定(式 1)，也意味著地表覆蓋與散射特性未有時間去相關的問題(Esmacili & Motagh, 2016)。為了同時顧及 PS 點的數量及品質，本研究採用過往文獻中常用的 0.3 作為篩選門檻，以保留足夠點位進行後續評估。

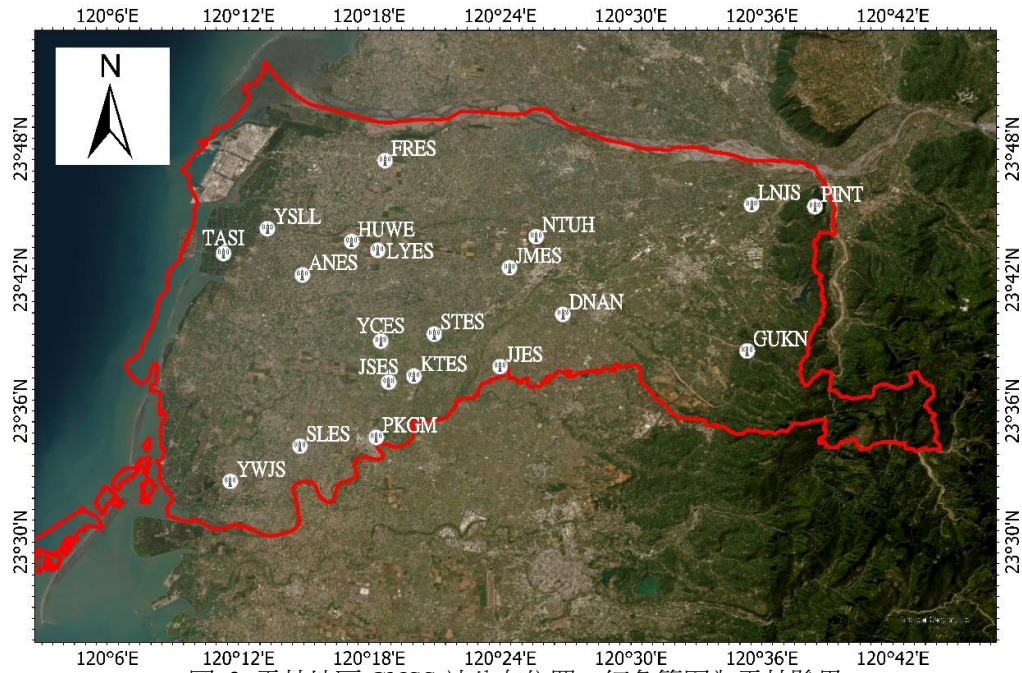


圖 3 雲林地區 GNSS 站分布位置，紅色範圍為雲林縣界

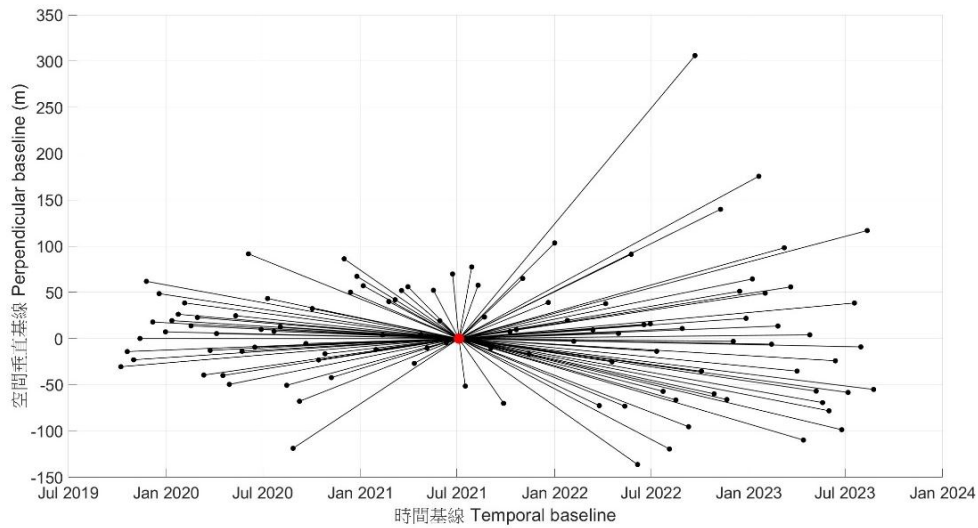


圖 4 本研究的時空基線圖，中間的紅點為主影像，其餘黑點為副影像

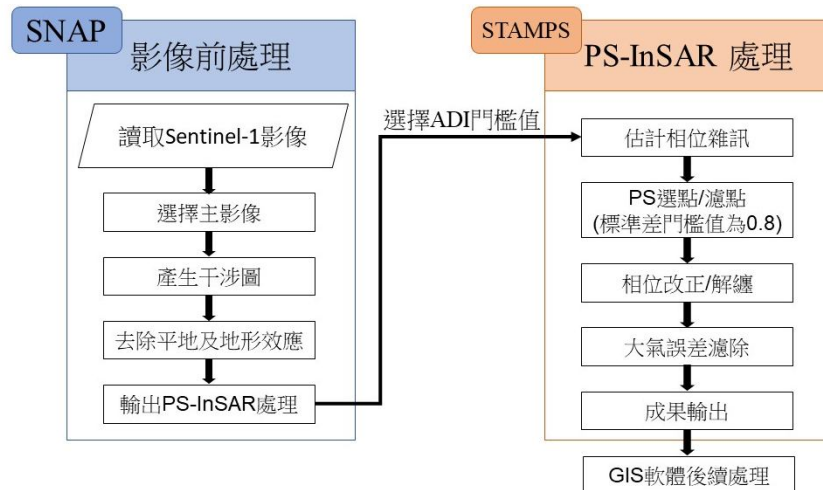


圖 5 本研究 PS-InSAR 處理流程圖

第二階段則使用 STAMPS(Stanford Method for Persistent Scatterers) 進行 PSInSAR 的處理 (Hooper *et al.*, 2004、Hooper *et al.*, 2010)。此階段包括相位雜訊估計、PS 選點及濾點、相位改正與解纏、大氣誤差濾除等步驟。在 PS 點選點/濾點階段，本研究進一步設置了 0.8 的標準差門檻值，以剔除相干性較低、不利於後續分析的點，提升分析精度與穩定性。最後輸出時間序列形變結果，並透過 GIS 軟體進行視覺化與空間分析，以利後續的地表變形解釋與應用。

$$D_a = \frac{\sigma_a}{a} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (|S_i| - \bar{|S|})^2}{N}} \dots\dots\dots (1)$$

σ_a ：反射強度的標準差

S ：SLC 像素的複數值

$|S_i|$ ：第*i*影像中像素強度值

$\bar{a}, \bar{|S|}$ ：反射強度平均值

3. 成果與分析

3.1 PSInSAR 成果

經由 STAMPS 產出之地表變形速率僅為沿視衛星方向(line of sight, LOS)的相對形變速率。若能在觀測期間透過一個或數個被認為地表穩定或已知相對基準變形速率的位置作為參考點，則可利用其作為形變計算的基準點，並將變形量由相對轉換成絕對。為選擇合適的參考點，本研究透過 GNSS 站點資料，先測試利用位於雲林縣的 LNJS 站作為單一參考點(圖 6)。圖 6 所示為該站點自 2019 至

2023 年間的垂直位移時序結果，其每日解在時間序列中垂直方向(Z 值)的變動穩定維持在 ± 2 cm 以內，顯示出良好的穩定性，因此被視為理想的基準位置。

PS-InSAR 高度依賴穩定的參考點，藉此計算所有觀測點相對於該點的變形速率 (Hussain *et al.*, 2022)，成果如圖 7 所示，可看出雲林地區在有多處顯示明顯下陷趨勢，然而，圖中部分區域呈現黃色至橘紅色的抬升現象，與實際地表變形情形略有不符。

因此本研究嘗試利用多重參考點進行校正，透過公式(2)的轉換公式，將 GNSS 站的三維變形量轉成 LOS 方向變形量，並將兩者差值透過 Kriging 空間內插形成校正面，再將這個殘差加回 PSInSAR LOS 結果中，作為校正後 LOS，校正後的結果如圖 8 所示，雲林地區多數地區呈現下陷趨勢，亦符合水利署及其他參考資料之空間分佈，顯示地層下陷現象具一定空間延續性，尤以紅框所示的元長鄉最為明顯，年下陷速率超過每年 5 cm。與初步結果相比，經過參考點校正後的成果為據 GNSS 橢球高程基準意義之絕對變形量，可正確反映地表相對於穩定點的實際變化量，進而提升結果的準確性與可比較性，有助於後續進行地層下陷程度評估與不同資料源(如 GNSS)間的對應分析。

$$D_{LOS} = D_U \cos \theta + D_E \sin \theta \sin \phi + D_N \sin \theta \cos \phi \dots\dots\dots (2)$$

D_{LOS} ：LOS 方向上的位移量

D_U 、 D_E 、 D_N ：三方向的位移分量

θ ：衛星入射角

ϕ ：衛星對地方位角

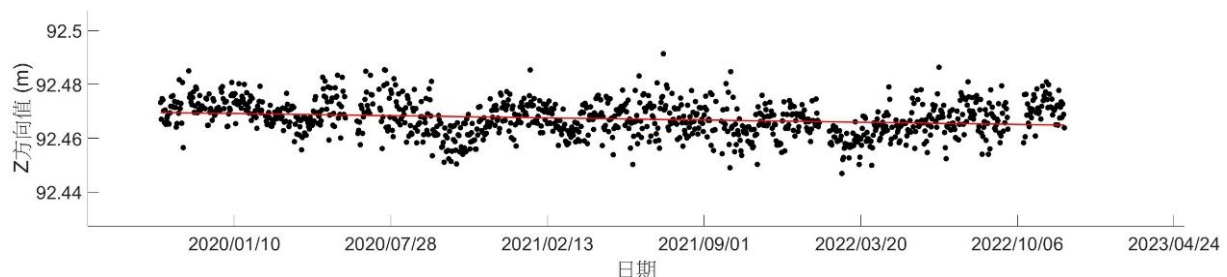


圖 6 LNJS 站點時序資料

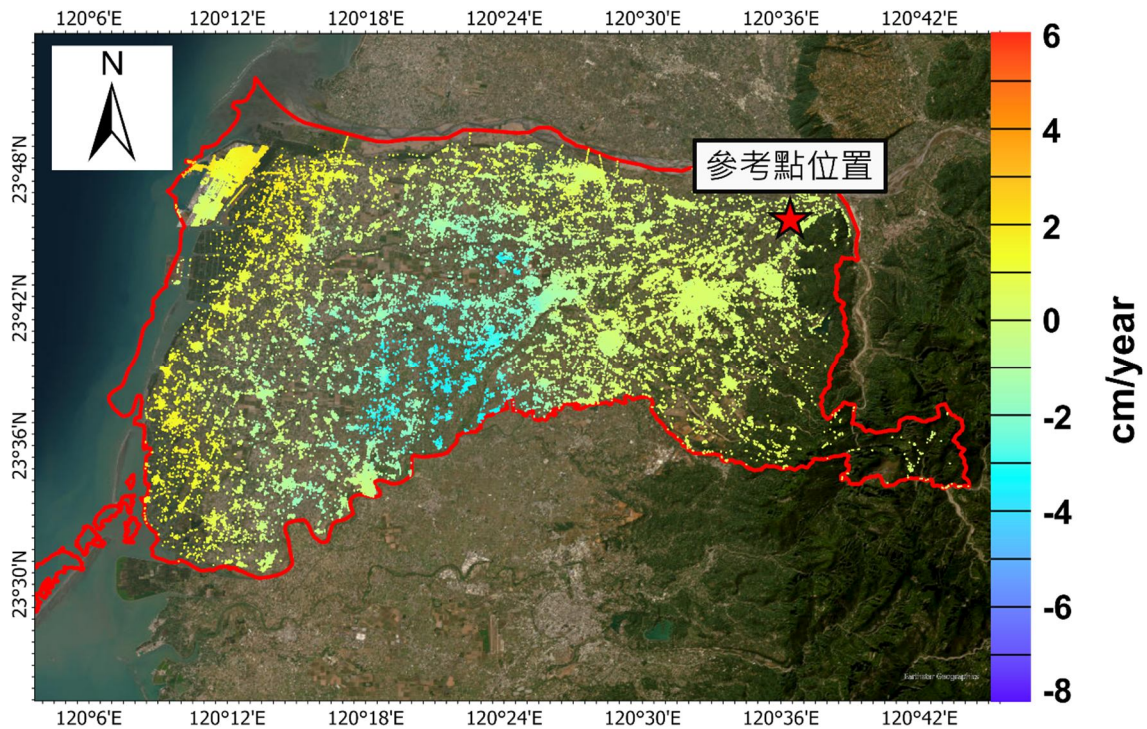


圖 7 單一參考點之 PSInSAR 結果

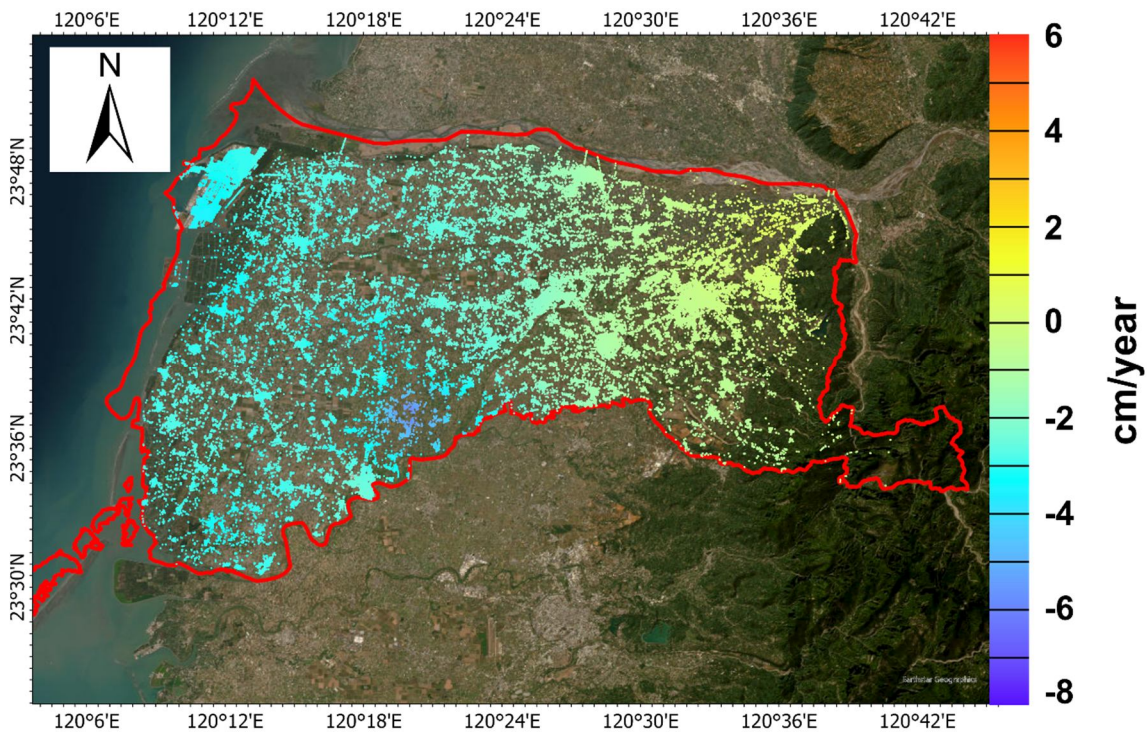


圖 8 經多重參考點校正後之成果，紅框範圍內為元長鄉

3.2 GNSS 驗證成果

為了驗證 PSInSAR 的結果，本研究使用了由國立中央大學地球科學系地殼形變實驗室提供的 GNSS 監測資料，總共選取 20 個 GNSS 站點並透過留一驗證(leave-one-out cross validation)流程以獨

立站進行驗證，計算這些站點自 2019 年至 2023 年間的垂直下陷速率，與 PSInSAR 所得到的 LOS 方向速率，為進行比較，先以式(2)進行反投影，將 PSInSAR 所得到的 LOS 方向變化量除以上方衛星對各 GNSS 站所對應的入射角(incidence angle)，轉換為垂直方向位移量，雲林地區對應的入射角分

布如圖 9 所示。進行比較。其結果如表 3 所示，列出了各站點的位置資訊、建置單位、PSInSAR LOS 方向速率與 GNSS 垂直監測速率的對比資料(單位為 cm/year)。大部分站點的 PSInSAR 與 GNSS 結果非常接近，顯示出兩種技術的監測結果具有良好的一致性。而圖 10 展示了 PSInSAR 速率與 GNSS 速率的對比關係，散布點多數分布於基準線附近，若針對 20 個站點速率數據進行的相關係數分析顯

示，兩者的相關係數 R 達到 0.98。

儘管整體呈高度相關，仍可觀察到部分站點在速率上存在些微差異，最可能的原因是 PSInSAR 量測的是沿衛星視線方向(LOS)的變形，與 GNSS 所提供的三維位移資訊不同，因此在轉換為垂直速率的過程中可能因入射角與軌道方向估算誤差而產生偏差，進一步導致兩者速率出現差異。

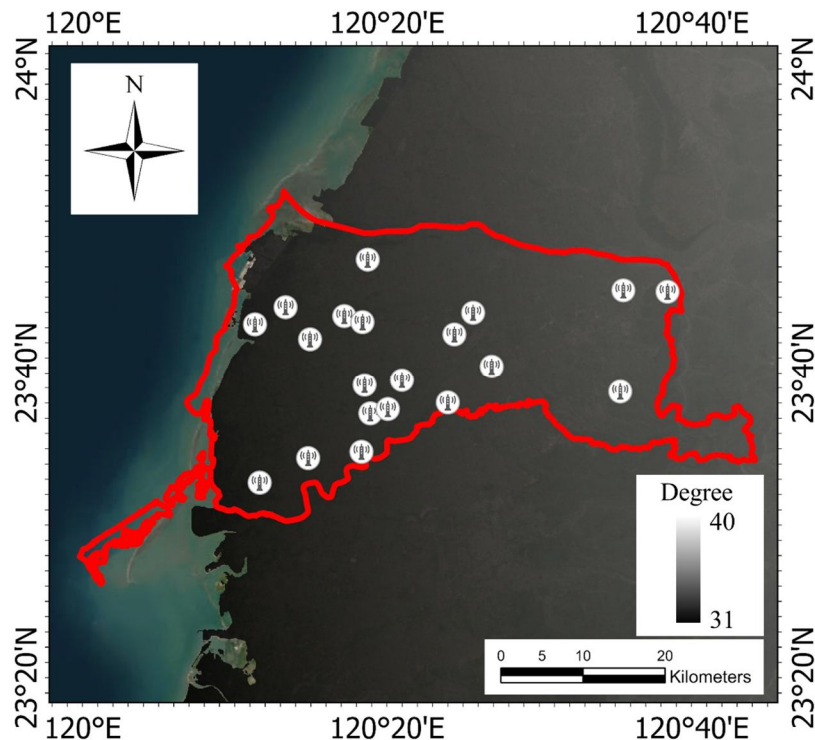


圖 9 雲林地區雷達衛星影像之入射角差異

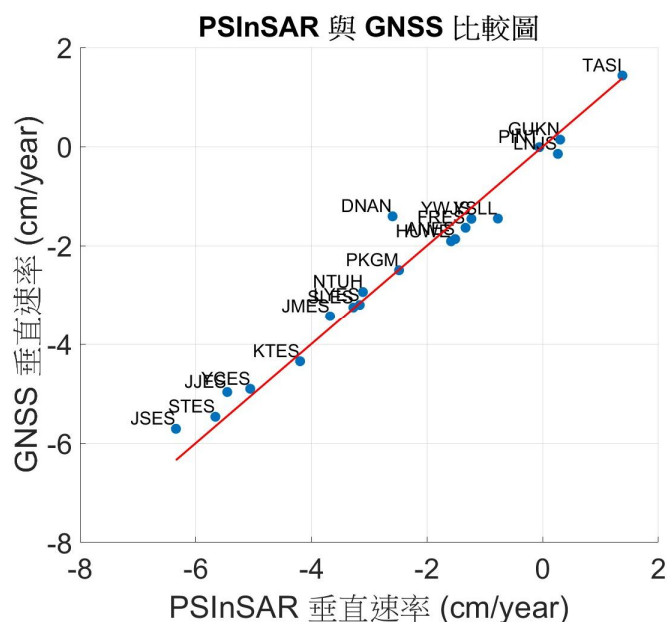


圖 10 PSInSAR 與 GNSS 結果散布圖，兩者相關係數為 0.98

表 3 PSInSAR 與 GNSS 結果比較

測站名稱	測站代號	經度	緯度	建置單位	PSInSAR 垂直方向速率 (cm/year)	GNSS 垂直速率 (cm/year)
安南國小	ANES	120.2491	23.70389	經濟部水利署	-1.5	-1.9
斗南	DNAN	120.4480	23.67381	交通部中央氣象署	-2.6	-1.4
豐榮國小	FRES	120.3122	23.79113	經濟部水利署	-1.3	-1.6
虎尾	HUWE	120.2866	23.72940	交通部中央氣象署	-1.6	-1.9
舊庄國小	JJES	120.4000	23.63393	經濟部水利署	-5.5	-5.0
拯民國小	JMES	120.4072	23.70933	經濟部水利署	-3.7	-3.4
忠孝國小	JSES	120.3150	23.62199	經濟部水利署	-6.3	-5.7
客厝國小	KTES	120.3343	23.62662	經濟部水利署	-4.2	-4.3
龍巖國小	LYES	120.3067	23.72271	經濟部水利署	-3.2	-3.2
中科虎尾	NTUH	120.4276	23.73302	經濟部水利署	-3.1	-2.9
北港	PKGM	120.3055	23.57989	內政部	-2.5	-2.5
水燦林國小	SLES	120.2472	23.57316	經濟部水利署	-3.3	-3.3
秀潭國小	STES	120.3498	23.65870	經濟部水利署	-5.7	-5.5
元長國小	YCES	120.3089	23.65331	經濟部水利署	-5.1	-4.9
新興國小	YSLI	120.2223	23.73917	經濟部水利署	-0.8	-1.5
宜梧國中	YWJS	120.1940	23.54623	經濟部水利署	-1.2	-1.5
古坑	GUKN	120.5888	23.64585	交通部中央氣象署	0.3	0.1
林內國中	LNJS	120.5922	23.75745	經濟部水利署	0.3	-0.1
坪頂	PINT	120.6406	23.75607	中央研究院 地球科學所	-0.1	-0.01
台西	TASI	120.1888	23.72027	內政部 國土測繪中心	1.4	1.4

3.3 時間序列分析

我們接著計算了在元長鄉中下陷量最高的 PS 點時間序列平均(圖 8 紅框範圍,約 3000 個 PS 點),把超過兩個標準差的 PS 點視為離群值並移除,重複至無離群值為止,其最終的時間序列如圖 11 所示,由圖上能看出此地區有著長期下陷的趨勢,平均下陷速率為每年 5.2 cm,圖上也同時顯示了不同年份於乾季第一期稻作期間的地層下陷速率。從圖中可以看出,這段期間內各年份均出現地層下陷的情況。2020 年與 2022 年的下陷速率分別為每年 10.2 cm 及 8.9 cm,雖然程度不一,但都顯示出一定的下陷趨勢。值得注意的是,2021 及 2023 年乾季第一期稻作期間的下陷速率顯著高於其他年份,達到了每年-16.1 及 15.8 cm,這與當年雨量極少的情況相符。由此可見,降雨不足對於地層的穩定性影響深遠,尤其是在農業用水需求高的乾季時期,容易因地下水抽取增加而導致地層大幅下陷。綜合以上結果,顯示出乾季第一期稻作期間的地層下陷速率與

當地降水情況和地下水使用密切相關。特別是在降雨不足的年份,應加強地下水管理,以減少地層下陷的風險。

4. 討論

為探討缺水事件對地層下陷的潛在影響,本研究選取 2020 至 2023 年間的 PSInSAR 時序結果,計算各年在 LOS 方向年下陷速率超過政府所訂「顯著下陷」標準(>3 cm/year)的空間分布情形與面積,結果如圖 12 及表 4 所示。從圖中可明顯觀察到,2021 年期間高下陷速率點位大量集中於雲林縣中西部平原地區,分布範圍與密度皆遠超 2020 與 2022 年。為了估算受影響區域的空間範圍,本研究將篩選後的經緯度點資料賦予值 1,並透過自然鄰近插值(griddata)生成連續空間分布,進一步利用 alpha shape 演算法限制插值區域的外部邊界。最終僅保留在 alpha shape 範圍內、且插值值大於 0 的網格,將其視為受影響區域,以估得受影響面積,結果顯示 2021 年超過年下陷速率 3 cm 的區域高達 514.8

km²，顯著高於 2020 年的 112.1 km² 與 2022 年的 235.4 km²。整體而言，2020 至 2022 年間 PS-InSAR 推估結果與水利署公告之下陷面積相近，顯示本研究方法在空間上具有良好的下陷偵測能力與一致性。然而，2023 年的估算面積(222.9 km²)與公告值

(247.7 km²)之間差距相對較大，推測主因可能來自於本研究所使用之 2023 年 Sentinel-1 影像僅涵蓋至當年 8 月，未能納入完整年度的觀測資料，導致估算結果呈現偏高，顯示影像時間涵蓋範圍對下陷面積估計具一定影響。



圖 11 整體下陷速率及各年缺水時期下陷速率

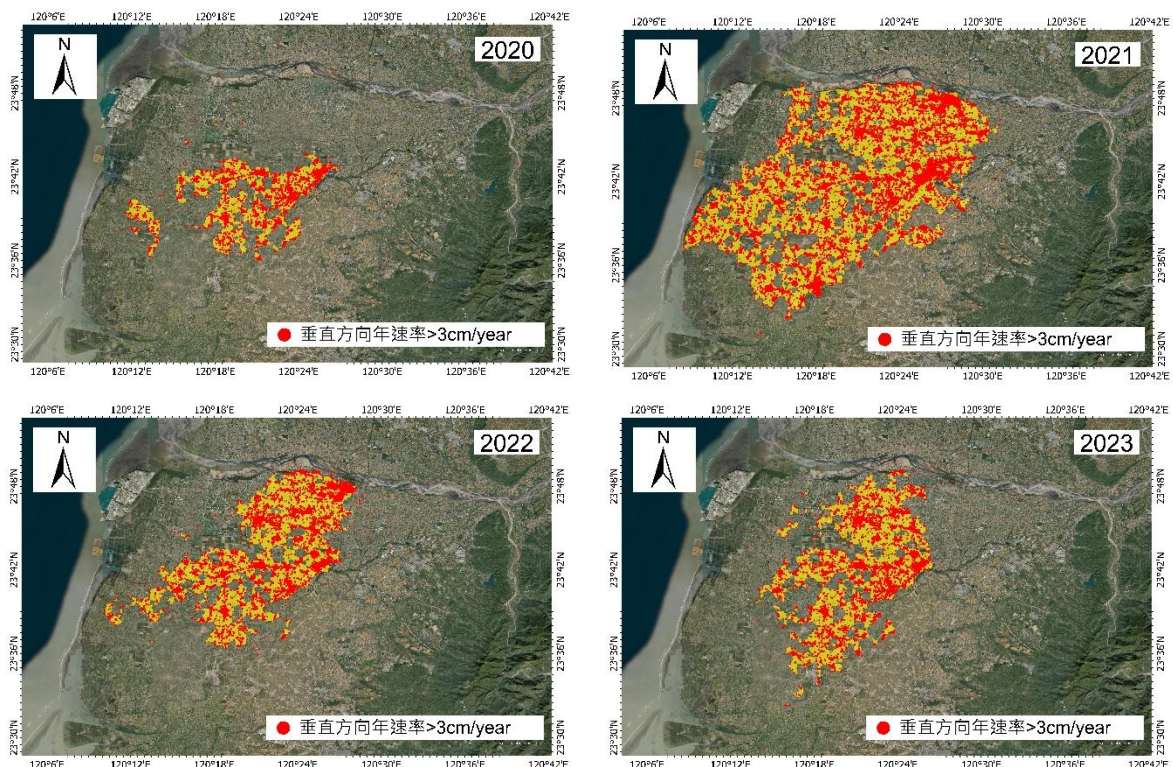


圖 12 各年年速率超過 3 cm 之點分布(紅點)及範圍(黃區)

表 4 各年下陷估算面積

年份	本研究估算面積 [km ²]	水利署公告面積 [km ²]	差異百分比 [%]
2020	112.1	103.8	8
2021	514.8	502.7	2
2022	235.4	239.5	-2
2023	222.9	247.7	10

5. 結論

本研究探討雲林縣在 2021 年與 2023 年乾旱期間面臨的嚴重地層下陷問題，特別是在降水量顯著減少的情況下，地下水的過度抽取進一步加劇了地層的下陷速率，某些區域的年下陷速率甚至超過每年 5 cm。透過運用永久散射體合成孔徑雷達差分干涉(PSInSAR)技術，結合 GNSS 站的數據，提供了更為準確的下陷速率數據。研究結果顯示，乾季期間的降水量與地層下陷之間存在密切的關聯，特別是在 2021 年，極低的降水量直接導致了地下水的過度抽取。基於這些發現，建議相關單位在水資源管理上應更加謹慎，特別是在乾季期間，考慮限制地下水的抽取，以減少地層下陷的風險。此外，應加強對地層下陷的監測與研究，並制定相應的政策以應對未來可能出現的乾旱與地層下陷問題。總之，本研究不僅揭示了雲林縣地層下陷的現狀及其與降水量的關聯，還為未來的水資源管理提供了重要的科學依據，期望能夠促進更有效的土地利用規劃與環境保護措施。

然而，PS-InSAR 技術主要依賴穩定散射體，在農田或建物稀疏區域可能存在監測覆蓋不足的限制。未來研究可考慮結合分布式散射體干涉技術(DSInSAR)，以補足低相干的區域，提升整體沉陷監測的完整性與可靠性。

參考文獻

- 全云霄、楊俊泉、胡曉佳、孟中璵，2024。基于 D-InSAR 技術的礦區地表沉陷監測研究，地球學報，45(3)：410-422，DOI：10.3975/cagsb.2023.122501。[Tong, Y., Yang, J., Hu, X., and Meng, Z., 2024. Monitoring land surface subsidence of coal mines using D-InSAR technology, Acta Geoscientica Sinica, 45(3): 410–422, DOI: 10.3975/cagsb.2023.122501. (in Chinese)]
- 經濟部水利署，2025。地層下陷監測資訊整合服務系統，https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/SubsidenceOverview/SubIndex/10009，引用 2025/04/28。[Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, 2025. Integrated information system for land subsidence monitoring, Available at: https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/SubsidenceOverview/SubIndex/10009, Accessed April 28, 2025. (in Chinese)]
- 交通部中央氣象署，2025。氣候觀測資料查詢服務，<https://codis.cwa.gov.tw/>，引用 2025/04/28。[Central Weather Administration, 2025. Climate observation data inquire service, Available at: <https://codis.cwa.gov.tw/>, Accessed April 28, 2025. (in Chinese)]
- Chen, K.H., Hwang, C., Tanaka, Y., and Chang, P.Y., 2023. Gravity estimation of groundwater mass balance of sandy aquifers in the land subsidence-hit region of Yunlin County, Taiwan, Engineering Geology, 315: 107021, DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107021.
- Ching, K.E., Hsieh, M.L., Johnson, K.M., Chen, K.H., Rau, R.J., and Yang, M., 2011. Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B8): B08406, DOI: 10.1029/2011JB008242.
- Cian, F., Blasco, J.M.D., and Carrera, L., 2019. Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: A methodology based on the integration of SNAP and StaMPS, Geosciences, 9(3): 124, DOI: 10.3390/geosciences9030124.
- Cigna, F., and Tapete, D., 2021. Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico, Remote Sensing of Environment,

- 254: 112254, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112254.
- Esmacili, M., and Motagh, M., 2016. Improved persistent scatterer analysis using amplitude dispersion index optimization of dual polarimetry data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117: 108-114, DOI: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.03.018.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20, DOI: 10.1109/36.898661.
- Franklin, K.R., and Huang, M.H., 2022. Revealing crustal deformation and strain rate in Taiwan using InSAR and GNSS, *Geophysical Research Letters*, 49(21): e2022GL101306, DOI: 10.1029/2022GL101306.
- Hooper, A., Spaans, K., Bekaert, D., Cuenca, M.C., Arkan, M., and Oyen, A., 2010. StaMPS/MTI manual, Delft Institute of Earth Observation and Space Systems Delft University of Technology, Kluyverweg, 1, 2629.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical Research Letters*, 31(23): L23611, DOI: 10.1029/2004GL021737.
- Hsu, W.C., Chang, H.C., Chang, K.T., Lin, E.K., Liu, J.K., and Liou, Y.A., 2015. Observing land subsidence and revealing the factors that influence it using a multi-sensor approach in Yunlin County, Taiwan, *Remote Sensing*, 7: 8202-8223, DOI: 10.3390/rs70608202.
- Huang, M.H., Bürgmann, R., and Hu, J.C., 2016. Fifteen years of surface deformation in Western Taiwan: Insight from SAR interferometry, *Tectonophysics*, 692: 252-264, DOI: 10.1016/j.tecto.2016.02.021.
- Hussain, M.A., Chen, Z.L., Zheng, Y., Shoaib, M., Ma, J.W., Ahmad, I., Asghar, A., and Khan, J., 2022. PS-InSAR based monitoring of land subsidence by groundwater extraction for Lahore Metropolitan City, Pakistan, *Remote Sensing*, 14(16): 3950, DOI: 10.3390/rs14163950.
- Ku, C.Y., and Liu, C.Y., 2023. Modeling of land subsidence using GIS-based artificial neural network in Yunlin County, Taiwan, *Scientific Reports*, 13(1): 4090, DOI: 10.1038/s41598-023-31390-5.
- Mahmoudpour, M., Khamchichyan, M., Nikudel, M.R., and Ghassemi, M. R., 2016. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran, *Engineering Geology*, 201: 6-28, DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.12.004.
- Minderhoud, P.S.J., Erkens, G., Pham, V.H., Bui, V.T., Erban, L., Kooi, H., and Stouthamer, E., 2017. Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam, *Environmental Research Letters*, 12(6): 064006, DOI: 10.1088/1748-9326/aa7146.
- Morishita, Y., 2021. Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1): 6, DOI: 10.1186/s40645-020-00402-7.
- Novellino, A., Cigna, F., Brahmi, M., Sowter, A., Bateson, L., and Marsh, S., 2017. Assessing the feasibility of a national InSAR ground deformation map of Great Britain with Sentinel-1, *Geosciences*, 7(2): 19, DOI: 10.3390/geosciences7020019.

- Ramirez, R.A.A., Lee, G.J., Choi, S.K., Kwon, T.H., Kim, Y.C., Ryu, H.H., Kim, S., Bae, B., and Hyun, C., 2022. Monitoring of construction-induced urban ground deformations using Sentinel-1 PS-InSAR: The case study of tunneling in Dangjin, Korea, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108: 102721, DOI: 10.1016/j.jag.2022.102721.
- Rateb, A., and Abotalib, A.Z., 2020. Inferencing the land subsidence in the Nile Delta using Sentinel-1 satellites and GPS between 2015 and 2019, *Science of the Total Environment*, 729: 138868, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138868.
- Tung, H., and Hu, J.C., 2012. Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of central Taiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR, *Tectonophysics*, 578: 126-135, DOI: 10.1016/j.tecto.2012.08.009.
- Tzampoglou, P., Ilia, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X., and Chen, W., 2023. Selected worldwide cases of land subsidence due to groundwater withdrawal, *Water*, 15(6): 1094, DOI: 10.3390/w15061094.
- WMO, 2023. State of the Global Climate 2023, Available at: <https://library.wmo.int/records/item/68835-state-of-the-global-climate-2023>, Accessed May 20, 2025.
- Yang, Y.J., Hwang, C., Hung, W.C., Fuhrmann, T., Chen, Y.A., and Wei, S.H., 2019. Surface deformation from Sentinel-1A InSAR: Relation to seasonal groundwater extraction and rainfall in Central Taiwan, *Remote Sensing*, 11: 2817, DOI: 10.3390/rs11232817.
- Yeh, T.K., Lee, T.Y., Lee, I.H., Shih, H.C., Chen, C.H., Yen, J.Y., and Ni, C.F., 2025. Combination on GNSS precise point positioning and InSAR data fusion to monitor the land subsidence in Taiwan, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1): 2445632, DOI: 10.1080/19475705.2024.2445632.
- Yusiyanti, I., Prajardi, T.W.K., Saputri, Y.I., and Pratama, C., 2023. Vertical deformation model on postseismic phase using exponential and logarithmic function based on InSAR, *Geodesy and Geodynamics*, 14(4): 392-400, DOI: 10.1016/j.geog.2023.01.003.

Monitoring Drought and Land Subsidence with InSAR Technology

Yun-Chiao Chang ¹ Kuo-Hsin Tseng ^{2*} Yu-Heng Tai ³

Abstract

The western plains of Taiwan have long relied on groundwater, and combined with uneven rainfall and droughts caused by climate change, land subsidence is easily triggered. Severe droughts in 2021 and 2023 further intensified subsidence during those years. This study applies the Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR) technique to analyze Sentinel-1 images from 2019 to 2023, integrated with rainfall data, to examine the impact of drought on subsidence rates. Results indicate that precipitation decreased sharply during drought periods and showed strong correlation with accelerated subsidence, with seasonal subsidence rates reaching up to 7.8 cm/year in severely water-stressed areas. To validate the results, GNSS stations were incorporated using multi-reference kriging interpolation, with independent stations used for comparison, yielding a correlation coefficient of 0.98. Furthermore, comparisons with significant subsidence areas published by the Water Resources Agency revealed differences of about $\pm 10\%$ between 2020 and 2023. These findings demonstrate that PSInSAR provides high accuracy and stability in monitoring detailed surface deformation and can serve as a valuable scientific basis for future water resource management, groundwater regulation, and land subsidence prevention.

Keywords: Persistent Scatterer InSAR, Land Subsidence, Precipitation

¹ Master Student, Department of Civil Engineering, National Central University

² Professor, Department of Civil Engineering, National Central University

³ Assistant Engineer, Center for Space and Remote Sensing Research,
National Central University

* Corresponding Author, E-mail: khtseng@csrslr.ncu.edu.tw

Received Date: Jan. 02, 2025

Revised Date: Apr. 14, 2025

Accepted Date: Sep. 22, 2025