

2018 南加州蒙特斯托土石流災害事件探討

梁庭語¹、施虹如¹、黃柏誠²、張志新¹

¹ 國家災害防救科技中心 坡地與洪旱組

² 國家災害防救科技中心 氣象組

摘要

2017 年 12 月蒙特斯托(Montecito)在經歷加州史上最大焚燒範圍的野火過後，留下大量燒毀的植被與缺乏水分的土壤，緊接著大氣長河¹(Atmospheric river)後的窄冷鋒雨帶(Narrow Cold Frontal Rainband)為聖塔芭芭拉地區(Santa Barbara) 帶來短延時的強降雨，因此觸發了土石流的發生，造成 21 人死亡，400 多棟房屋受損，數條主要道路被土石阻斷。聖塔芭芭拉郡政府注重災前的預警及災後的處理，郡網站與專線皆有詳盡的處理方法與流程，供居民及時應變與解決各種後續問題。

一、 災害概述

2017 年底南加州的蒙特斯托(Montecito)剛結束加州史上最大焚

¹ 大氣長河(Atmospheric river, AR)，是位於較低層大氣，輸送水氣的狹長廊道，範圍橫跨數千公里，能將熱帶的水氣與熱量帶往中緯度地區。

燒範圍的野火(Thomas Fire²)，2018 年 1 月 9 日凌晨，突然的大雨降在大火肆虐後光禿禿的山坡上，在凌晨 4 時左右帶來了極具破壞力的土石流，土石從山上的焚燒區域一路流向海洋。

根據聖塔芭芭拉郡(Santa Barbara)發布的消息，自 2018 年 1 月 9 日起截至 21 日，共計有 21 人死亡，28 人受傷，仍有 2 人失蹤，至少 400 戶房屋損壞或全毀，3,000 戶受到影響，6,000 戶斷電。土石流影響範圍達 30 平方英里 (約 78 平方公里)，聖塔芭芭拉郡的蒙特斯托、薩默蘭(Summerland)和鄰近 Thomas Fire 焚燒地區的卡平特里亞(Carpinteria)皆受影響，由於道路上堆積的土石，101 公路約有 30 英里(將近 50 公里)一度禁止通行，直到 1 月 21 日才再度完全開放通行。在土石流侵襲的大部分區域，天然氣、水、電皆被迫中斷供應，救難人員擔心許多受困人員的物資供應會短缺。倖存者被倒塌的樹木、散落的物品與深度及腰的土石所困住，地面團隊與空中團隊同時進行搜救行動，有些居民們甚至自己動手開挖土石與殘垣找尋失聯的家人與朋友，現場情形可見圖 1。

² 美國野火命名通常是以野火開始地區的地理位置、地標、街道、湖泊、山峰等來命名，使消防調度更有效率。2017 年 12 月南加州野火事件，起火地點在 Thomas 學院附近，故被命名為 Thomas Fire。



圖 1 土石流過後的現場情形。(圖源：SBCFD)

圖 2 為美國太空總署的地球觀測衛星 Landsat 8 上裝載的陸地成像儀(Operational Land Imager, OLI)所拍攝的蒙特斯托地區火災前與土石流災後的照片，放在一起比較，可以明顯看出一大片被燒光的山林(由綠色轉褐色)與土石流流經的侵蝕溝(圖上指示的 Engorged stream)。

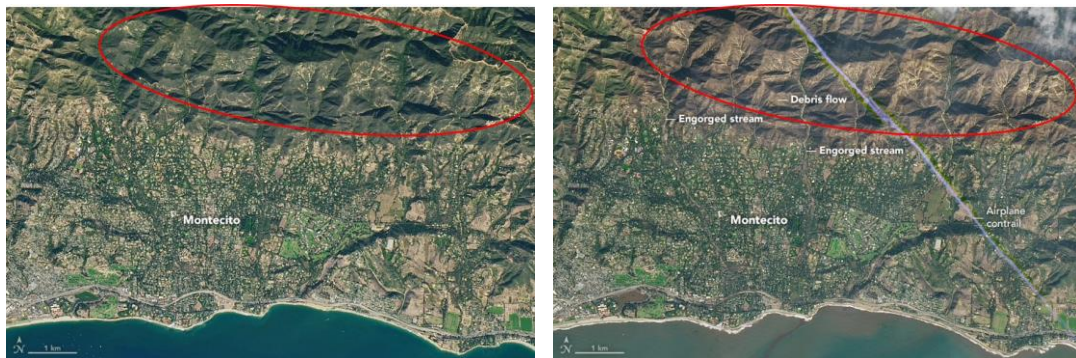


圖 2 Landsat 8 OLI 影像，左圖時間為 2017 年 11 月 23 日，火災與土石流災前，右圖時間為 2018 年 1 月 10 日，火災與土石流災後。(圖源：NASA)

聖塔芭芭拉郡政府也在 1 月 18 日發布一張最終災損檢查地圖(見圖 3)，提供災損分布資料，圖中的訊息與數據是損傷檢測專家(Damage Inspection Specialist, DINS)團隊以系統性的檢查程序蒐集得到，他們

以目視檢查財產和自然資源是否已損壞或具潛在損壞風險，將毀損程度分為五個等級，分別為：全毀(Destroyed)、半毀(Major)、小部分毀壞(Minor)、受影響(Affected)、難以接近(Inaccessible)，並必須在事件發生後的 36 小時內，向國土安全暨應急管理組(HSEM)提供初步評估，讓上級機關判斷如何提供援助。由於損傷檢查受限於地形、植被、被土石流影響區域的定位困難等等，導致可能無法識別所有因土石流損壞的建築物。

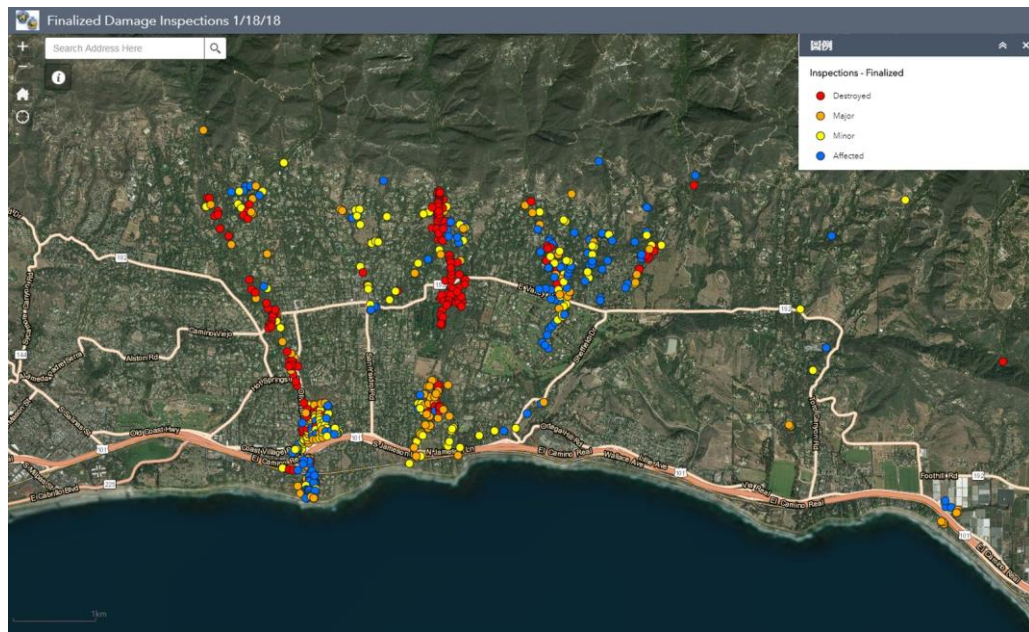


圖 3 最終災損檢查地圖(圖源：聖塔芭芭拉郡政府)

二、 地理環境

蒙特斯托(Montecito)位於美國南加州聖塔芭芭拉郡東側(見圖 4)，Transverse 山脈區域，背山面海，部分社區建在聖伊內斯山(Santa

Ynez Mountains)山腳下較低的山麓地區，美國 101 公路從南端經過，連接蒙特斯托與其他城市。蒙特斯托屬於溫和的地中海型氣候，夏乾冬雨，冬季常有對流系統經過，因鄰近海洋，陸上微風能顯著的調節溫度，使得蒙特斯托相對內陸的城市更為冬暖夏涼。

南加州的雨幾乎都集中在冬季雨季的時候，通常從 11 月一直持續到隔年 4 月。美國地質調查局(Geological Survey)指出，當地 30 分鐘內只需要降下 7 毫米的雨量就會觸發土石流(debris flows)，而任何降雨強度超過每小時 10 毫米的風暴都有可能發生土石流。因此，火災過後，被選定的區域需要進行土石流潛勢評估，並提前疏散暴露在危險區域的民眾。

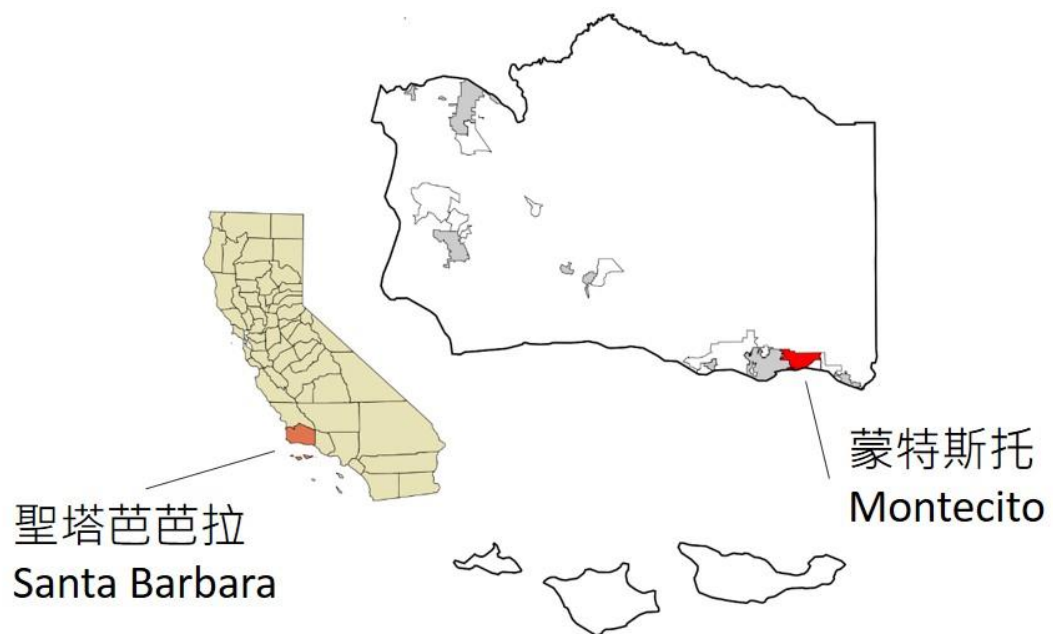


圖 4 蒙特斯托在聖塔芭芭拉郡及加州的位置。

三、 氣象與水文分析

美國西部天氣與極端水文事件中心 (Center for Western Weather and Water Extremes, CW3E)提出，窄冷鋒雨帶(Narrow Cold Frontal Rainband, NCFR)的一系列強降雨，是 Thomas Fire 火災過後，造成致命又極具破壞力的土石流的主要氣象驅動因素。火災後的土石流並不一定需要前期降雨，很短時間內的強烈降雨就可能觸發土石流。

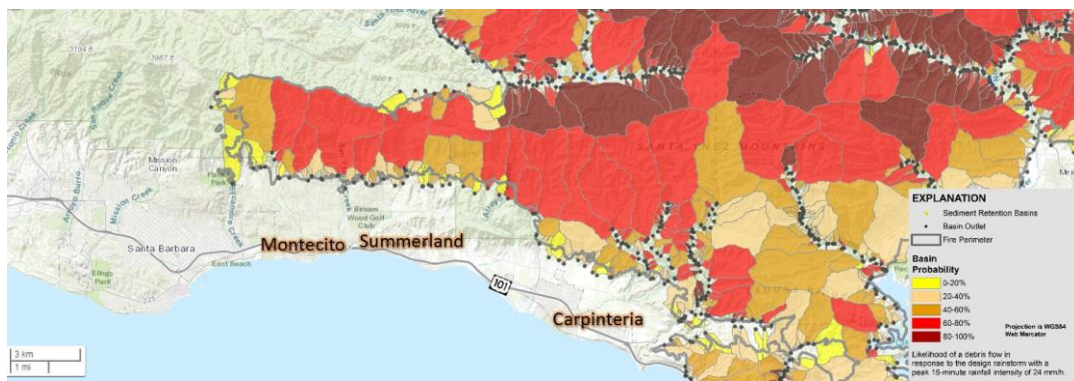


圖 5 Thomas Fire 焚燒範圍在設計雨型下的土石流潛勢 (圖源:USGS)

圖 5 顯示 Thomas Fire 的焚燒區域內，在設計雨型下，土石流發生的可能性 (降雨型態設計為：峰值 15 分鐘的強度為每小時 24 毫米的降雨速率，或在 15 分鐘內降下大約 0.25 英吋(6.35 毫米)的雨量)。圖中可見，蒙特斯托(Montecito)的山區在設計雨型下，皆被評估為具有很高的土石流發生機率。

窄冷鋒雨帶(Narrow Cold Frontal Rainband, NCFR)是一個沿著冷鋒的窄帶狀的強對流降雨，窄冷鋒雨帶在離岸形成並於 1 月 9 日，當

地時間(PST³)早上 1 點之後在 Pt. Conception 登陸。當窄冷鋒雨帶與地表和地形交互作用時，暫時減弱、分裂，並在南加利福尼亞灣(Southern California Bight)再度增強。窄冷鋒雨帶在大約當地時間早上 4 點，為 Thomas Fire 燃燒地區的最西端帶來高強度的降雨。當地時間早上 1 點與當地時間早上 4 點的雷達回波圖可見圖 6。

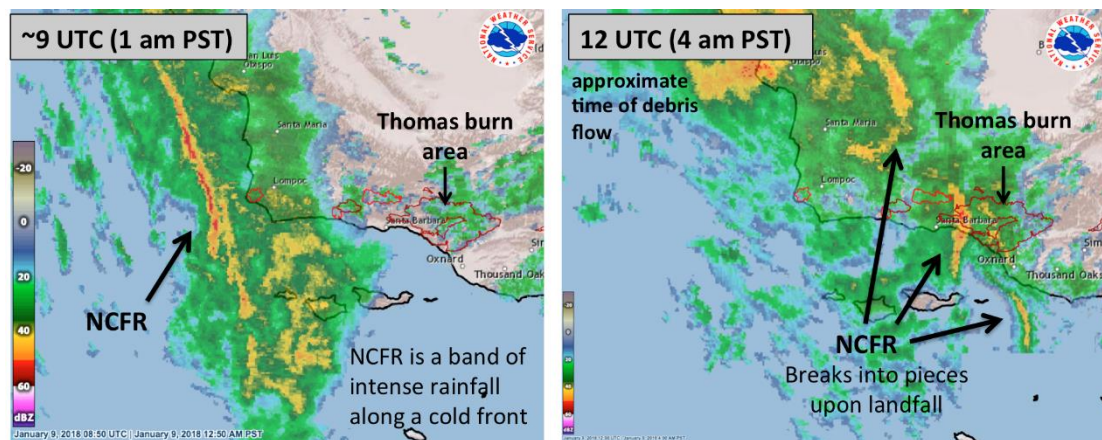


圖 6 2018 年 1 月 9 日的雷達回波圖，可見產生高強度降雨的窄冷鋒雨帶，左圖為當地時間早上 1 點，右圖為當地時間早上 4 點。

圖 7 是 2018 年 1 月 9 日當地時間早上 4 點，中低層大氣(850 百帕)的水氣模式分析場。

³ 1 月的加州使用太平洋標準時間(Pacific Standard Time, PST)，相當於 UTC-8。

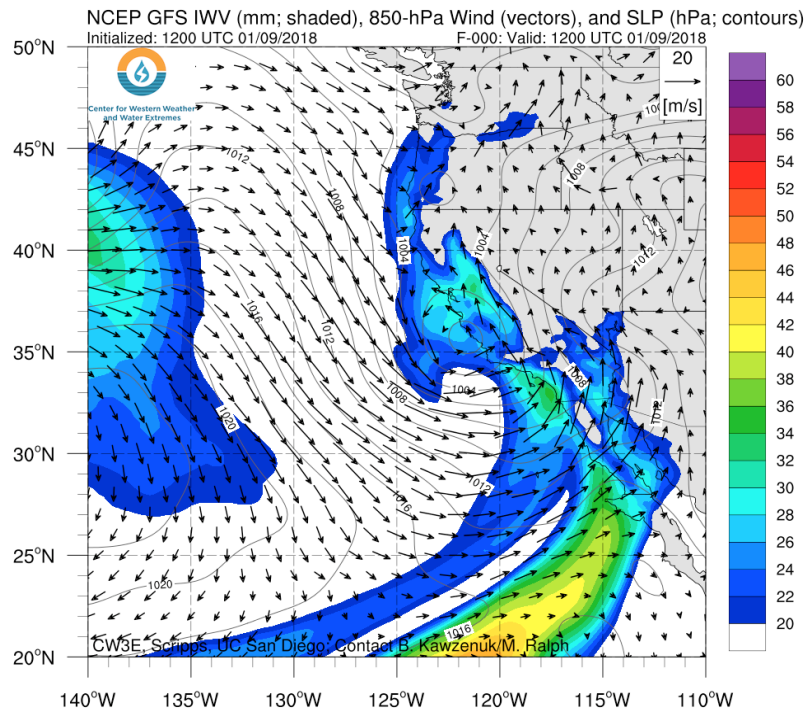


圖 7 土石流事件發生時蒙特斯托附近海域上的低壓系統與雙帶狀的大氣長河 (2018 年 1 月 9 日 12UTC)。漸層為水氣(單位：mm)。

雙水氣帶的南北向大氣長河與低壓系統相互作用，圖 7 可見，在土石流事件發生之前，主要的大氣長河已經往東南方移動，當窄冷鋒雨帶驅動引致土石流的高降雨速率的同時，大氣長河幫忙將水氣輸送至該區域。

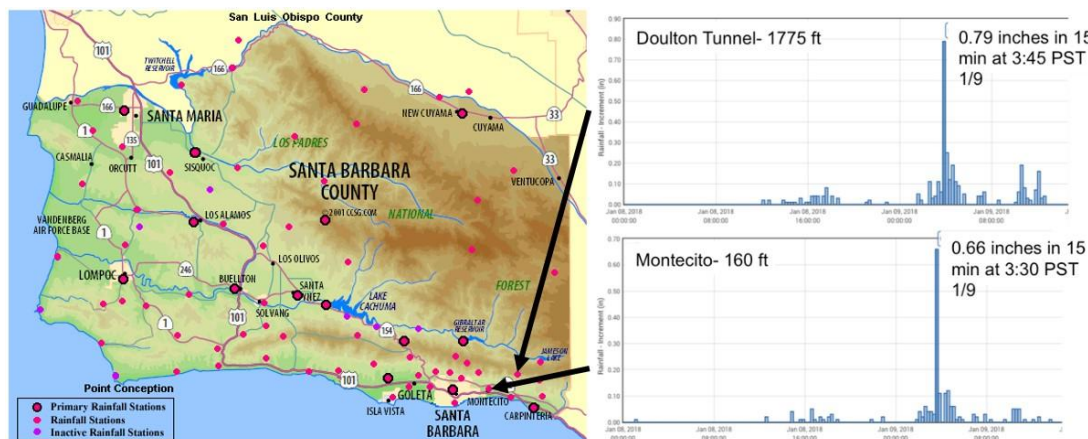


圖 8 土石流發生區域鄰近測站的降雨強度(右上:Doultan Tunnel;右下:Montecito)降雨速率以 15 分鐘為一個區間，不同於 15 分鐘最大值(資料來源：SBCPWD)

就降雨總量而言，這對該地區來說，是一場溫和的冬季風暴，但窄冷鋒雨帶產生強烈的降雨，根據 NOAA 降雨頻率圖集(NOAA Atlas 14)，在許多測站觀測到的 15 分鐘降雨速率等同於 25-50 年重現期的降雨頻率，卡平特里亞測站量測到一個 15 分鐘累積降雨 0.86 英吋(大約 22 毫米)的紀錄，相當於 100 年重現期的降雨頻率。圖 8 展示兩個鄰近蒙特斯托(Montecito)的測站雨量時序。1 月 8 日與 1 月 9 日單日累積降雨可見圖 9。

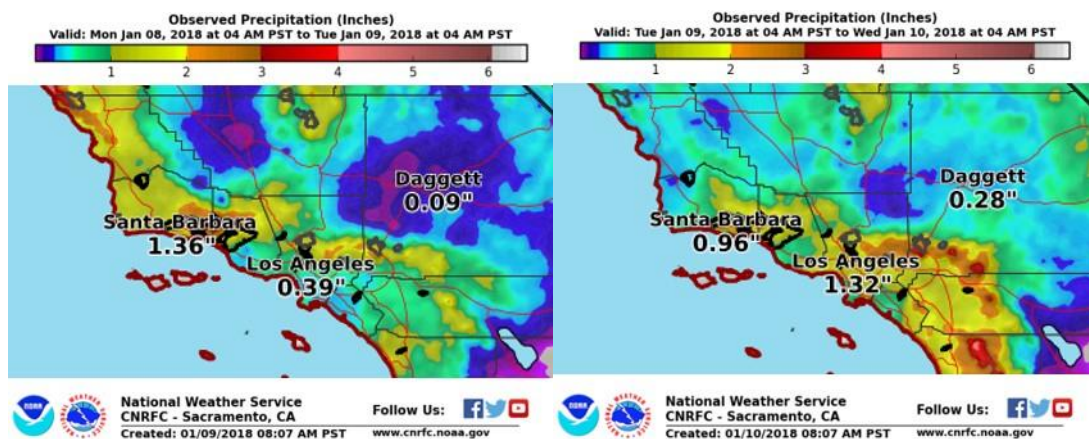


圖 9 2018 年 1 月 8 日(左圖)與 1 月 9 日(右圖)一日累積雨量，可見聖塔芭芭拉地區在兩日分別累積了 1.36 英吋與 0.96 英吋的雨量。(黑色粗線為本年度火災焚燒範圍)

四、政府作為

在 Thomas Fire 之後，聖塔芭芭拉郡政府嚴正以待的劃定強制撤離區與自願撤離區(圖 10)，並發布消息予民眾，提醒大家警惕暴雨帶來的土石流風險。1 月 8 日總計有 7,000 位居民需要強制撤離。

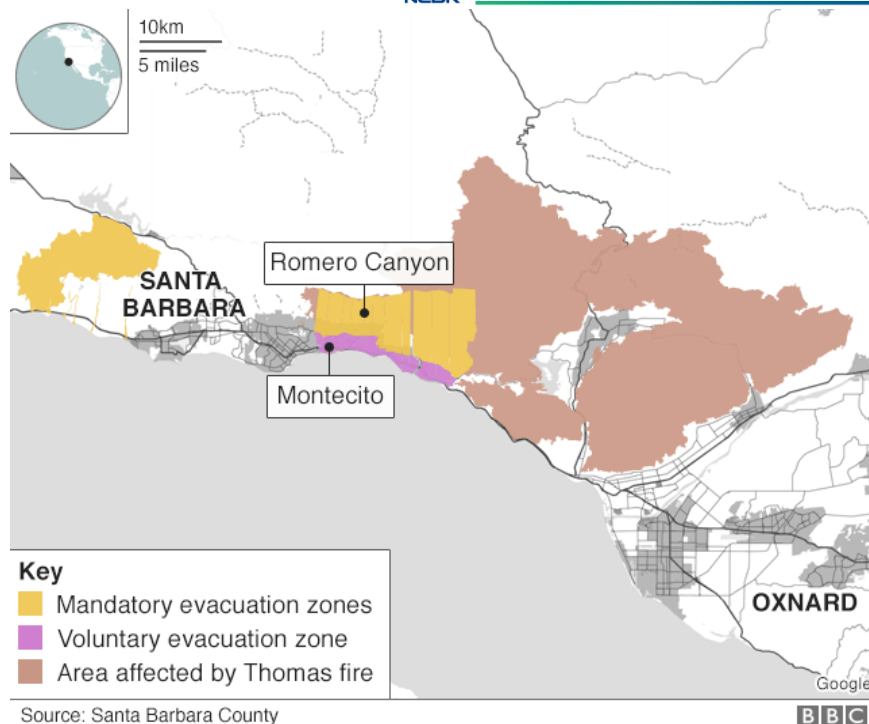


圖 10 強制撤離區(黃色)與自願撤離區(粉色)(圖源：聖塔芭芭拉郡政府)

節錄聖塔芭芭拉郡政府於野火過後所發布消息內容，指出“Thomas Fire 使得山坡上只剩少許植被，增加邊坡滑動潛勢，隨著冬季風暴的接近，山洪暴發與土石流的威脅比火災前高出 10 倍——土石流可能在低預警或毫無預警的狀態下發生。政府在事件發生前通知大眾的時間很有限。民眾必須了解情況的嚴重性並做好準備，不要遲疑，並採取行動來保護自己、家人和財產。”

美國國家氣象局(National Weather Service, NWS)在 2018 年 1 月 5 日發布的預報中提到，1 月 8 日至 10 日南加州地區預期將有大範圍降雨，最近被野火焚燒過的區域，可能會發生暴雨和土石流(見圖 11)。

Significant Storm possible for Southwest California next Monday – Wednesday Jan. 8-10, 2018



Weather Highlights

- Potential for moderate to heavy rain across SW CA Mon night – early Tue
 - 1-2" of rain possible for the coast & valleys
 - 2-4" mtns (highest south facing slopes)
- Gusty South Winds (especially mtns)
- Resort-Level Snow

Confidence

- Moderate confidence in rainfall amounts and timing

Potential Impacts

- Flash flooding/debris flows possible in recent burn areas
- Urban roadway flooding
- Downed trees/power lines (mainly mountains)
- Traffic delays and road closures

Weather Forecast Office
Los Angeles/Oxnard, CA

Follow Us:   
weather.gov/LosAngeles

圖 11 美國國家氣象局 2018 年 1 月 5 日加州天氣預報

土石流發生之後，美國海岸防衛隊和國民警衛隊派出直升機與救援人員，來自洛杉磯、橙郡、文圖拉郡的消防員們和直升機也趕往蒙特斯托進行救援，當天晚上至隔日清晨出動一架具夜視能力的飛機不斷在災區上方盤旋。許多民眾因土石堵塞道路而受困，直升機不斷來回將受困的民眾送離羅梅羅峽谷(Romero Canyon)區域。

災後，郡政府網站上也有詳列後續處理辦法與尋求幫助的途徑，如災難復原中心的開放、洪災後返家的注意事項、清理土石可尋求協助的途徑、下次強降雨來臨前可以預先做的準備等。

五、 災害特性討論(複合型災害)

近期發生的 Thomas Fire 使山洪暴發、土石流更容易發生。火災過後，受到破壞的植被、燒焦的草叢與流失水分的土壤會導致嚴重的土壤侵蝕與山洪暴發。火焰消耗掉平常吸收水分的落葉堆與地面堆積的物質，再加上火災後的土壤會較火災前更具疏水性⁴ (hydrophobic)，所以火災後的洪水氾濫是需要關注的嚴重威脅。

植物有許多保護性的化學物質，它們包覆住葉子以防止水分流失，這些物質與蠟相似，透過火焰的高溫被蒸發到空氣中，當火焰開始冷卻時，它們會凝結在土壤表面，這些物質覆蓋住土壤，導致落下的雨水更易形成水珠並快速的流失。一般來說，火災強度越大、持續時間越久，焚燒過的土壤就會更具疏水性。過量的雨水會將灰燼和殘骸掃入溪流與河流，汙染天然和人造水源。短期內，流失的植被和疏水性的土壤會造成山洪暴發和侵蝕。而當種子和未損壞的植物結構試著在焚燒區域再生時，它們需要水，但雨水卻很難滲入有”防水層”的土壤，有時會延長嚴重焚燒區域的復原過程，長期上，影響新植物的生長。

火災區域緊急修復小組(Burned Area Emergency Rehabilitation,

⁴ 這裡的疏水性是指災後的土壤表面會形成一層不易透水層，使得水不易滲入，且流失快速。

BAER)必須在火災撲滅後的七天之內做出評估報告，定位出易於發生火災後侵蝕的區域(見圖 12)，並盡其所能預防土壤流失與洪水氾濫，如果威脅存在，該報告必須包含可以在第一次破壞性風暴來臨前執行的緩解措施。科學家們使用機載儀器和衛星資料繪製出焚燒過後的地景，去支援復原團隊定位嚴重燒傷的地區，幫助預防火災後的災難。

災害地圖的製作方法有很大一部份依靠感測器提供的資料，但大多涉及植被特徵的使用，如：常態化差異植生指標 NDVI、常態化差異火燒指標 NDBR，來作為土壤狀態的指標。

植被吸收紅光並反射近紅外光。NDBR 是基於植被在紅外光波段反射能量，而土壤傾向反射中紅外光譜部分的能量的觀測結果。常態化差異植生指標 NDVI 和常態化差異火燒指標 NDBR 的關係被用來將衛星影像中的區域分類成四種嚴重程度等級：高、中等、低、未燃燒。

另一項使得此次事件如此危險的關鍵因素是——「降雨的速率」。雖然總降雨量並不特別多，但異常強烈的降雨在風暴一開始就降在焚燒區域附近，蒙特斯托在短短五分鐘內降下 13 毫米的雨，鄰近的卡平特里亞也在 15 分鐘內獲得 22 毫米的雨量，遠超出每小時 10 毫米的觸發土石流門檻值。被野火燒焦的土壤吸收水分的能力較

差，從而增加了它被移動並造成土石流的可能性。

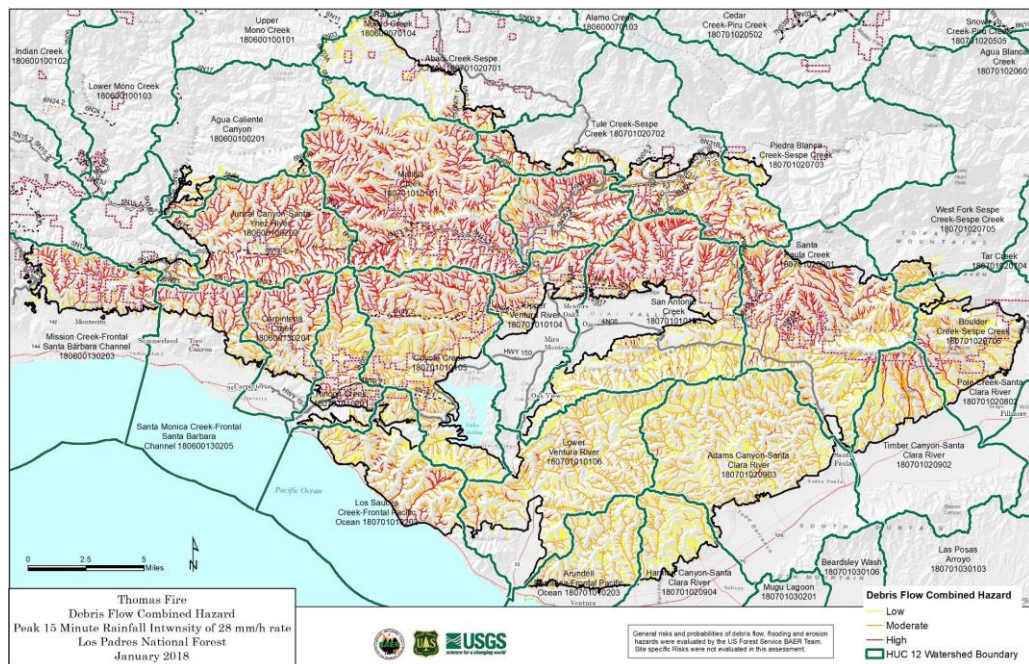


圖 12 Thomas Fire 的土石流綜合風險圖(圖源：Burned Area Emergency Rehabilitation, BAER)

六、 結論

火災過後，更具疏水性的土壤，使得山洪暴發、土石流更容易發生，這類災害對蒙特斯托來說並不陌生，1964 年，Coyote Fire 過後，蒙特斯托也經歷了一場損失慘重的土石流。可見火災過後對災區的後續土石流潛勢評估有其必要與立即性。

一些學者(Oakley et al 2017；Young et al 2017)也針對火災後的土石流以及驅動它們的大氣特徵做了長時間的研究，發現加州地區的土石流，約有八成的事件發生在大氣長河登陸當天或是登陸後的隔天。

複合型災害事前的預警、當下的處理及未來的恢復作業，對於好

發此種災害的加州是很重要的課題。

複合型災害事件較單一天然災害事件來的複雜，且影響程度更劇更廣，隨著複合型災害事件越趨頻繁，對災因高度的警覺性、預警的重要性、救災時調度人力物力的機動性及後續處理過程的全面性，皆是需要不斷修正再精進的課題。

參考文獻

1. <https://www.countyofsb.org/january-storm-info.sbc> --聖塔芭芭拉郡政府
2. <https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=91573&src=eoaiotd> --Landsat 8 OLI image
3. <https://www.countyofsb.org/rainready.sbc> --Fire Burn Area Storm Preparedness Information
4. <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/BAER/> -- Satellites Aid Burned Area Rehabilitation
5. <https://www.cnrfc.noaa.gov/> --CNRFC(California Nevada River Forecast Center)
6. <https://www.usgs.gov/> --USGS(U.S. Geological Survey)
7. <https://sbc-gis.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=ee848a57d8b2416eb2802da300df5b6e>
8. <https://www.fs.usda.gov/detail/lpnf/home/?cid=fseprd570093> – Thomas burned area report by USDA-Forest Service BAER Team
9. <http://www.latimes.com/local/lanow/la-me-mudslide-montecito-mainbar-20180111-story.html> --Many still trapped as death toll rises in Montecito mudslides
10. <http://cw3e.ucsd.edu/meteorological-conditions-associated-with-the-deadly-9-january-2018-debris-flow-on-the-thomas-fire-burn-area-impacting-montecito-ca-a-preliminary-analysis/> --CW3E, January 16, 2018
11. <http://cw3e.ucsd.edu/iwv-and-ivt-forecasts/> --CW3E(Center for Western Weather and Water Extremes)
12. <http://www.sbcfire.com/> --SBCFD(Santa Barbara County Fire Department)
13. <http://demo.epageview.com/FOG2017/viewer/desktop/#page/86> --FIREScope

Field operations guide ICS 420-1

14. <https://dps.mn.gov/divisions/hsem/disaster-recovery/Documents/preliminary-damage-assessment-field-guide-with-pa.pdf> --HSEM Preliminary Damage Assessment(PDA) Field Guide
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Montecito,_California
16. <http://planetgeniusmagazine.com/news/california-mudslides-before-and-after/--Evacuation-zones>
17. <https://weather.com/news/news/2018-01-10-southern-california-rain-mudslides-latest>
18. <http://www.countyofsb.org/pwd/monthlyrain.sbc>
19. <https://www.dailynews.com/2018/01/05/significant-rain-in-southern-california-possible-next-week/>
20. http://www.fire.ca.gov/fire_protection/downloads/FireNames.pdf
21. <https://hellogiggles.com/news/how-did-thomas-fire-get-name/>
22. Oakley, N. S., Lancaster, J. T., Kaplan, M. L., & Ralph, F. M. (2017). Synoptic conditions associated with cool season post-fire debris flows in the Transverse Ranges of southern California. *Natural Hazards*, 88(1), 327-354.
23. Young, A.M., K.T. Skelly, and J. Cordeira, 2017: High-impact hydrologic events and atmospheric rivers in California: An investigation using the NCEI Storm Events Database. *Geophysical Research Letters*, 44, doi:10.1002/2017GL073077.