

2021 年美國德州寒害事件

施虹如¹、黃柏誠²、傅鑣漩¹、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

美國德克薩斯州於 2021 年 2 月中旬，在 10 天內接連遭受三場嚴酷的冬季風暴，由於極端寒冷天氣的影響，使得德州整體電力需求打破過去歷史紀錄，然而因電力設備缺乏防凍設計導致發電機組陸續凍結故障，造成發電量快速下降，使得交流電頻率降低至臨界值，若持續供電，恐造成德州整體電網大崩潰，因此，德州電力可靠性委員會(ERCOT)最後採取暫停部分地區供電，使得當地將近 450 萬戶家庭及企業連續幾天在極端低溫且無電可用下度過，同時還面臨停水及食物短缺危機。根據德州衛生服務部截至 7 月 14 日統計，整場事件造成至少 210 人死亡，死因包括：體溫過低、一氧化碳中毒、火災或車禍等，經濟損失高達 1,300 億美元，也是美國有紀錄以來損失最慘重的冬季風暴。

一、前言

德州位於美國南側，緊鄰墨西哥及墨西哥灣，四季氣候暖和，首都休士頓一月的日均溫介於 12°C 至 17°C，除了有美國第二高人口數 (2,918 萬人)，還是坐擁全球石油與天然氣的重鎮。

德州的電力系統不同於其他州，其擁有獨立電網(圖 1)，主要負責的機關為德州電力可靠性委員會(The Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)，管理著德州超過 2,600 萬客戶的電力流動，占該州電力負荷的 90%，剩餘的部分則由西部聯合電網及東部聯合電網協助供電。其大部分電力來自於天然氣(2020 年為 46%)、風能和煤炭(分別為 23%和 18%)，其次為核能(11%)、太陽能(2%)以及水力等。也因為德州電網屬於一獨立系統調度機構(Independent System Operator, ISO)，與州外電網的高壓直流輸電連接較少，因此在電力中斷期間，ERCOT 幾乎無法從其他州獲得足夠的電力供應；再加上，其發電設備僅針對夏季熱浪過載有處理機制，以及多數發電廠建在建築物外，以利降低夏季過熱的風險，但在寒冷時期便會暴露在外，且缺乏防凍設計，使得災害期間風力發電機、火力發電廠及核電廠因輸氣管、柴油機組、冷卻系統等設備凍結而癱瘓，有超過 50%常備發電量因低溫凍結而失去運作，造成德州約 450 萬戶居民在冰天雪地中連續斷電超過 30 小時，除了造成生活功能完全中斷，仰賴天然氣的供暖系統也

完全無法運作，以及衍生因水管凍結而停水等狀況發生。

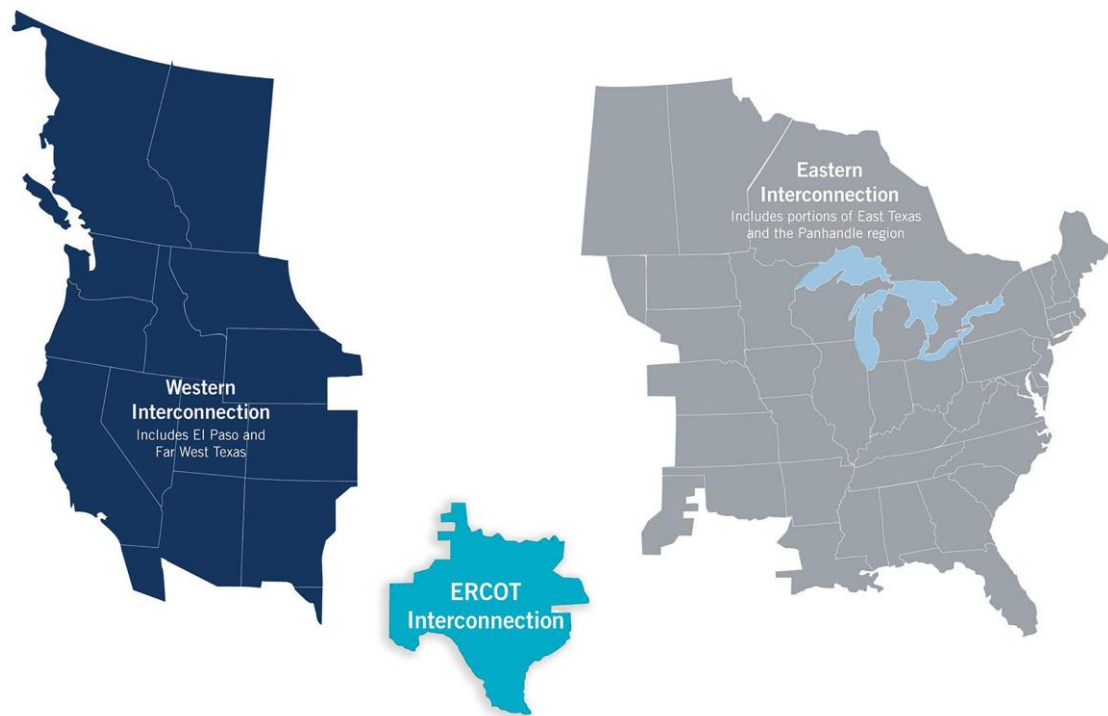


圖 1 美國本土電網分成三大電網系統組成，分別是西部聯合電網、

東部聯合電網及德克薩斯州電網(ERCOT)

(資料來源：Joshua W. Busby, etc. 2021)

二、 氣象分析

2021 年 2 月中旬美國接連受到三波冬季風暴侵襲，其中第二波冬季風暴烏里(Uri)影響最大，其自 2 月 12 日由美國西北部形成，陸續席捲整個美國中部，包含平常不受冬季風暴影響的中南部地區，美國國家氣象局甚至首度針對德州休士頓發布風寒警報(wind chill warning)，直至 2 月 18 日於美國東北部離開，影響時間長達一週。

此次冬季風暴在美國中南部地區創下許多最低溫紀錄，於 2 月 16 日美國約有 73% 國土被冰雪覆蓋，而華氏 0 度線(攝氏-17 度)在 2 月 16 日甚至達到德州最南端(圖 2)，德州達拉斯在 2 月 16 日達到-16 °C，是 1989 年來的最低溫，而該地區 2 月的氣候值為 15 °C。

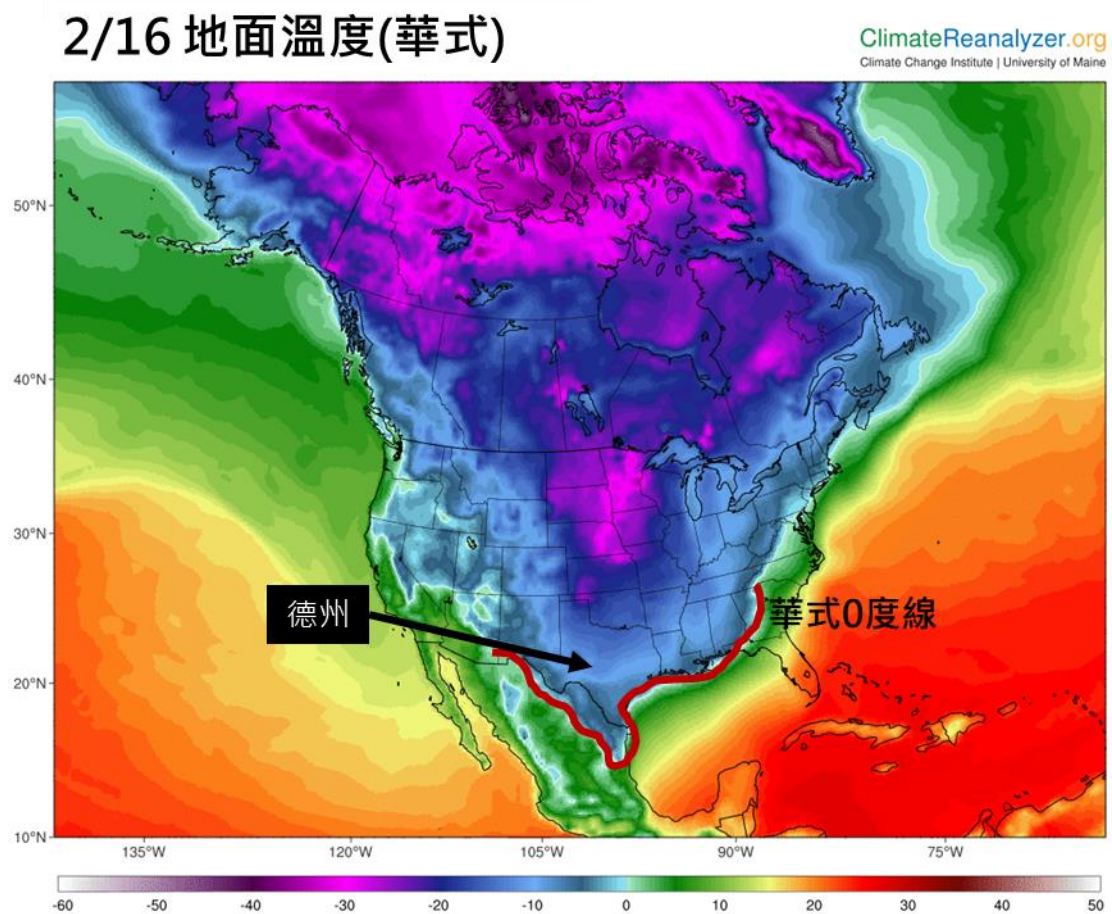


圖 2 2021 年 2 月 16 日北美地區地面溫度圖，紅色為華氏 0 度線，2 月 16 日低溫達最南邊(資料來源：Climate Reanalyzer)

此次極端低溫天氣是由於 1 月初的北極上空平流層突然增暖 (Sudden Stratospheric Warmings, SSWs)，引發緩慢的大氣連鎖反應，

使得將冷空氣鎖在極地渦漩(Polar Vortex)的西風噴流(風速很大的風)減弱，將冷空氣外溢至中緯度地區，包含歐洲、美國等地(圖 3)，加上從極地到德州地區並沒有地形阻擋，因此冷空氣長驅直下。因極地渦漩潰散造成冷空氣外溢的事件常見於冬季，上次 2014 年北美寒害事件也是相同的原因造成，但是每次發生潰散的原因及冷空氣外溢的範圍及區域並不相同，像 2014 年並無平流層突然增暖事件且僅對美國中北部及東部地區造成寒害。

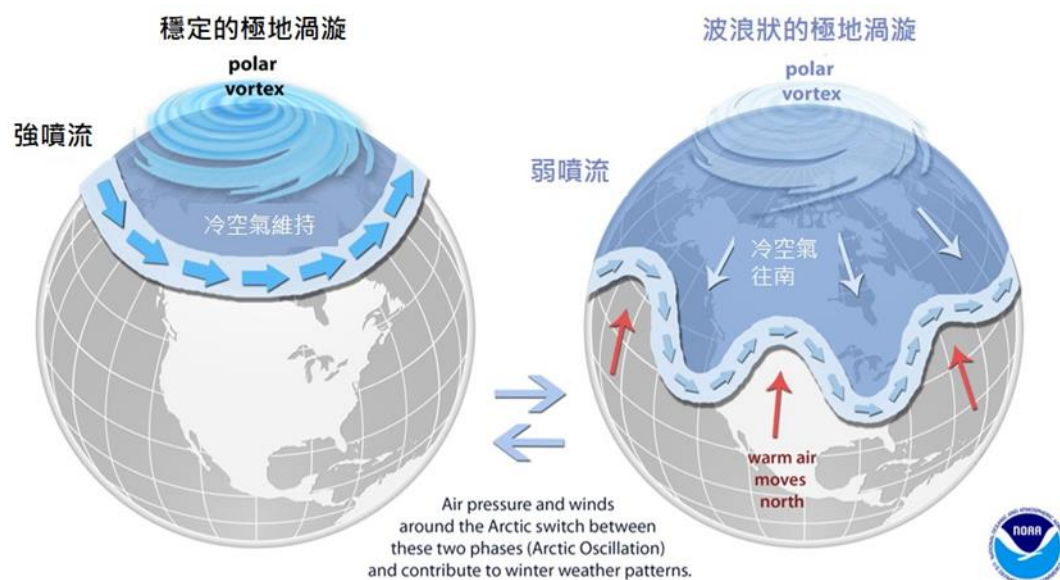


圖 3 極地渦漩變化圖，左圖為平時狀況，通常於冬季極地渦漩會變成較不穩定且往南擴散(右圖)，將極區空氣往南傳送(資料來源：美國國家海洋暨大氣總署(NOAA))

三、 災害衝擊

受到冬季風暴連日侵襲，造成全美數百個地區出現創紀錄低溫，

多達七州宣布進入緊急狀態。在美國東岸、中部及南部多處地區因低溫導致道路結冰、停電、交通受阻及機場被迫關閉影響大量航班運行等災情傳出，其中又以德州尤其嚴重，包括位於德州的北美最大煉油廠也關閉，影響東岸逾五分之三的燃料供應，以及面臨大規模停電、停水危機等，以下將針對本次德州的災情做詳細說明。

3-1 電力問題

由於受到嚴酷的寒冷天氣影響，導致能源需求激增。從圖 4 歷程說明可見，2 月 14 日由於溫度驟降至 -10°C ，德州整體電力負載在同日下午迅速上升至 68.6GW，打破過去冬季最高紀錄的 66GW，並從負載預測 15 日需求恐上升至 76.8GW，然而因為極端低溫導致部分工廠和天然氣設備陸續故障，出現超出預期的 30GW 的電力短缺；並且，基於交流電的電網需要非常窄的 60Hz 範圍內的頻率以保持穩定性，若低於 59Hz 頻率將造成整個電網關閉，而在 2 月 15 日凌晨，德州電網的頻率一度下降到 59.4Hz 以下長達 4 分 23 秒(圖 5)，若停留時間超過 9 分鐘或甚至更長，ERCOT 表示整個電網將會崩潰，導致該州陷入黑暗。因此，隨著需求上升和供應的下降，ERCOT 自 2011 年 2 月以來首次宣布「能源緊急警報 EEA 3 級」(分級說明可見附錄一)，並於 2 月 15 日凌晨 1:25 下令暫停供電。基於發電缺口如此之大，

仍需為醫院和消防站等關鍵基礎設施預留可用電力，因此沒有足夠的備用容量來輪換停電，造成最初預期的輪流供電變成了多天停電，影響德州約 450 萬戶居民在極端低溫下連續斷電超過 30 小時，當時災情如圖 6 至圖 8 所示。

其實，早在 2011 年 1 月 31 日至 2 月 3 日期間的 Groundhog day 冬季風暴也曾造成德州電力設備出現無法運行狀況，ERCOT 除了以各地輪流停電形式，並向墨西哥進口部分電力，當時仍有 300 萬戶家庭與企業受影響，事後聯邦能源監管委員會(FERC)有呼籲當地發電廠進行冬季防寒設備改造，以適應極端低溫天氣，然而當地發電廠因改造成本過高並未有相對應變處置；而過了將近十年時間，本次冬季風暴橫跨整個州，造成寒冷的時間更長，使得德州再次面臨大規模停電危機，由於德州電網本身獨立性，再加上風暴期間，與德州電網連接的西南電力持負責的州也需要輪流停電，另一個連接的墨西哥也有 470 萬用戶停電，難以從其他電網獲得支援，因此，ERCOT 認為在此極端天氣狀況下相連電網並無法提供德州電力支援。

事件後 ERCOT 的首席執行官被解雇、8 名董事會成員辭職。另外，還有四家公用事業公司宣布破產，包括：Brazos Electric Power Cooperative、Just Energy、Brilliant Energy 及 Griddy Energy。其中，

Griddy Energy 因將批發價格轉嫁給客戶而成為新聞，這導致數千名德州人面臨須負擔超高電費，其中一些超過 10,000 美元；與此同時，由於在風暴期間以非常高的價格銷售天然氣，許多天然氣供應商宣布增加利潤、股票回購和增加股息。

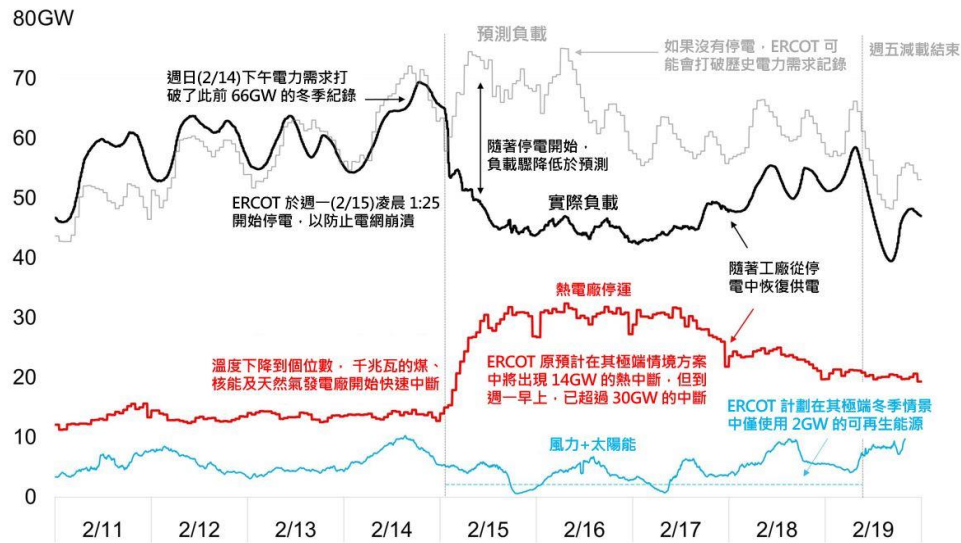


圖 4 冬季風暴影響期間的電力負載狀況與 ERCOT 在停電的應變歷程

(資料來源：Joshua W. Busby, etc. 2021, ERCOT)

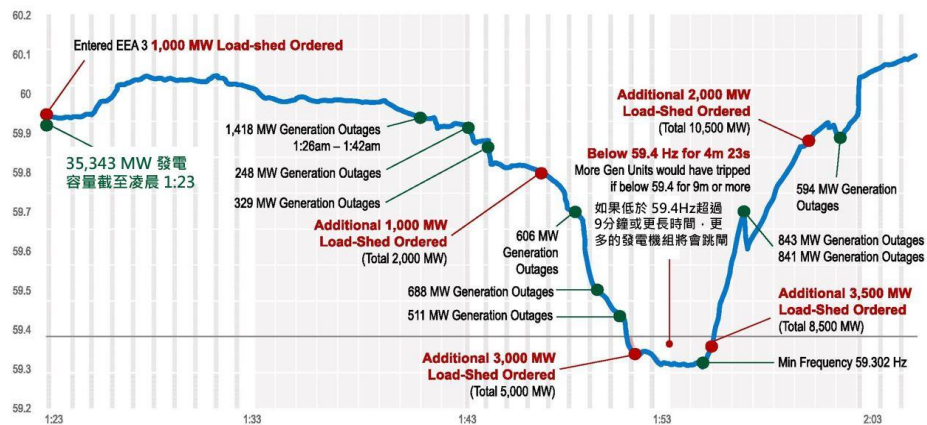


圖 5 2021 年 2 月 15 日凌晨 1:23 至 2:03 期間交流電的頻率變化歷程

(資料來源：ERCOT)

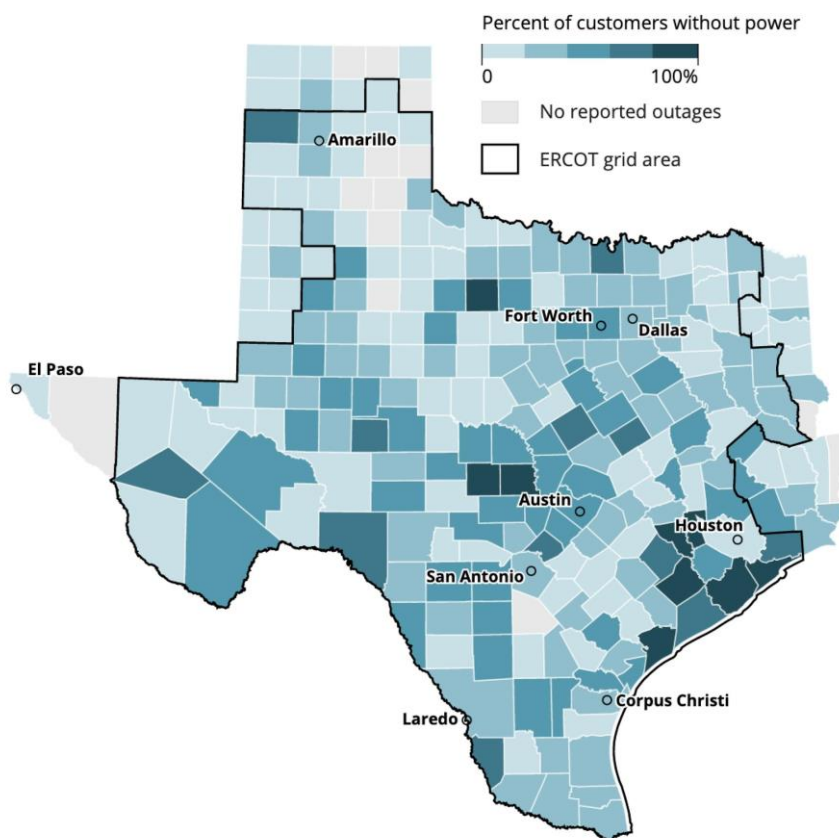


圖 6 德州各行政區於 2021 年 2 月 16 日的停電占比程度

(資料來源： ERCOT, The Texas Tribune and ProPublica)

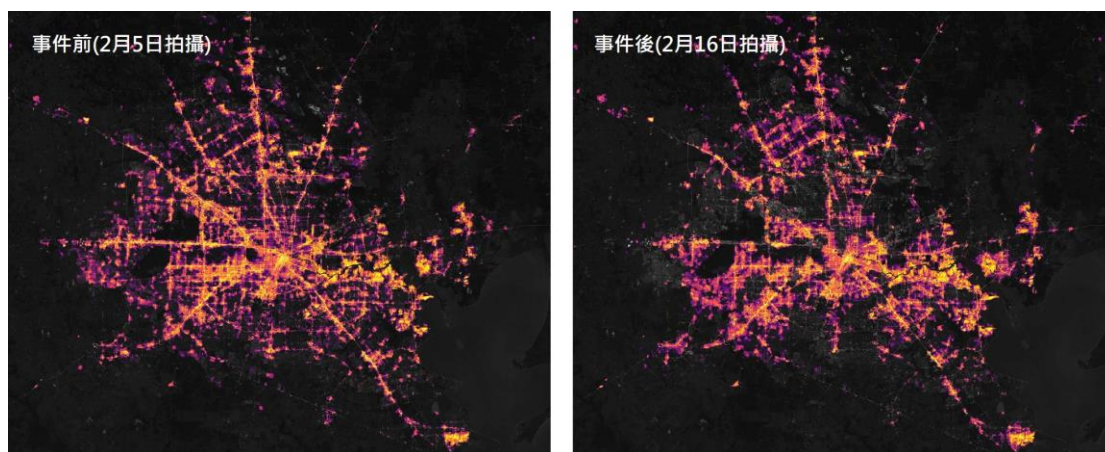


圖 7 左圖為事件前(2 月 5 日)，右圖為事件後(2 月 16 日)於德州休斯頓的衛星影像(資料來源：NASA)



圖 8 2021 年 2 月 16 日在美國的德州沃斯堡，電力公用事業卡車停在城鎮西南側準備進行停電搶救作業
(資料來源：EPA/達志影像授權)

3-2 衍生的其他災情

因為極端低溫造成供水管道凍結和破裂，導致德州有 202 郡的 1,200 個公共自來水系統受到影響，直至 2 月 18 日仍有 1,400 萬德州人面臨供水中斷的情形，在休士頓、聖安東尼奧、奧斯丁及沃斯堡等地區皆收到「煮沸自來水通知」(Boil Water Notice)，因低水壓可能導致細菌趁隙滲入管線，州政府要求在飲用、烹飪或清潔前要將水先燒開。2 月 19 日，雖電力僅剩 19 萬戶停電，但有數百萬人仍面臨無乾

淨自來水可用的問題。2 月 23 日，尚有 340 萬人沒有自來水供應。

由國民兵與美軍向民眾發送瓶裝水，或在市政府等多處設置取水站提供民眾臨時用水，但仍無法滿足需求，超市的飲用水也被搶購一空。

另外，由於惡劣的天氣條件和大面積停電，全州大多數商店都無法滿足對食品和其他雜貨的需求增長。許多雜貨店因停電而被迫關閉，而在那些仍然營業的雜貨店中，麵包、牛奶和雞蛋等許多基本商品已完全售罄。

並且，寒冷低溫再加上缺乏天然氣來供應電暖設備的運作，人們試著採取危險的方式為他們的房屋取暖，像是室內生火、開煤氣爐或車內取暖，增加一氧化碳中毒與火災的風險。

而正值全球 Covid-19 大流行期間，疫苗部分也因寒冷天氣而受阻，導致當地疫苗接種中心暫時性關閉。2 月 16 日，當地州衛生官員反應，因冬季風暴延後了原定數十萬劑的疫苗交付，數百家醫療機構的一百萬劑疫苗注射計劃也因此告吹。

四、 政府作為

德州州長 Greg Abbott 於 2 月 12 日發布了災難宣告，動員各個部門清理積雪。隨著局勢惡化，2 月 13 日州長要求聯邦緊急聲明，拜登總統於 2 月 14 日批准了該聲明並宣布德克薩斯州進入「緊急狀態」

(Emergency Declaration)，授權國土安全部和聯邦緊急事務管理局(FEMA)在德州全境提供緊急援，FEMA 則向該州運送了 60 台發電機、水及毛毯等物資。而為了緩解能源短缺，州長也命令天然氣生產商暫停將天然氣出口到州外，而是在德州境內銷售。2 月 16 日，州長宣布 ERCOT 改革是州議會的緊急優先事項，將對停電進行調查以確定長期解決方案。2 月 19 日，努埃塞斯郡對 ERCOT 提起訴訟，認為德州電力基礎設施存在疑慮問題多次未被重視。2 月 20 日總統拜登批准宣布德州進入「重大災難狀態」(Major Disaster Declaration)，以便聯邦政府通過更多撥款救災。2021 年 3 月，德州議會提出了一系列法案，將採取措施防止未來在極端溫度下停電。眾議院第 11 號法案定義了極端天氣條件，為監管機構和行業設計提供指引。眾議院第 14 號法案將創建德州供應鏈安全和繪圖委員會(Texas Supply Chain Security and Mapping Committee)，以優先考慮極端天氣期間的能源需求。同年 5 月，立法機關批准了參議院法案 2 和參議院法案 3，以徹底改革該州的電網，這些法案包括要求發電廠設備能承受極端天氣、建立緊急警報系統和為電力公司制定貸款計劃。

五、 結論

2021 年 2 月中旬美國受到冬季風暴的影響，在美國中南部地區

創下許多極端低溫的紀錄，有超過 3,000 個測站達到 75 年來最低溫，而中南部地區甚至低於氣候值約攝氏 15 度以上。此次低溫原因主要是由於平流層突然增暖造成極地渦旋空氣潰散，加上冷空氣剛好經過中南部平原區一路往南到德州，造成德州達到歷史低溫紀錄。

而德州在受到強烈北極寒流侵襲下導致當地大規模的供電、供水中斷，整場事件造成至少 210 人死亡，經濟損失高達 1,300 億美元，也是美國有紀錄以來損失最慘重的冬季風暴。有鑒於此，為避免未來再次面臨極端氣候威脅，州政府須重新考慮該州對能源的監管方法、需求響應及擴大州際互連等潛在解決方案。

參考文獻

1. 世界氣象組織(WMO)，Extreme winter weather hits USA, Europe
<https://public.wmo.int/en/media/news/extreme-winter-weather-hits-us-a-europe>。
2. The Weather Channel，Our Recap of a Frenetic Stretch of Record-Breaking Winter Weather
<https://weather.com/storms/winter/news/2021-02-19-record-cold-snow-winter-storms-stretch-recap>。
3. NOAA，On the sudden stratospheric warming and polar vortex of early 2021
<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/sudden-stratospheric-warming-and-polar-vortex-early-2021>。
4. 美國能源信息署(U.S. Energy Information Administration, Eia)
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46836>

5. 德州電力可靠性委員會(ERCOT) <http://www.ercot.com>
6. Joshua W. Busby, Kyri Baker, Morgan D. Bazilian, Alex Q. Gilbert, Emily Grubert, Varun Rai, Joshua D. Rhodes, Sarang Shidore, Caitlin A. Smith, Michael E. Webber(2021). Cascading risks: Understanding the 2021 winter blackout in Texas. Journal of Energy Research & Social Science, Volume 77.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629621001997>
7. Pedernales Electric Cooperative, PEC
<https://www.pec.coop/savings/power-rush-hour/breaking-down-ercot-alerts/>
8. Federal Energy Regulatory Commission, FERC <https://www.ferc.gov/>

附錄一：ERCOT 能源緊急警報(Energy Emergency Alert)

為了有效管理與保護電網穩定運作，ERCOT 可因應不同電力狀況對民眾與企業發出五種能源緊急警報，包括：正常(Normal)、保護警報(Conservation)、EEA1、EEA2 及 EEA3，以下針對各等級說明：

表、ERCOT 能源緊急警報分級說明(資料來源：ERCOT, PEC)

ERCOT Level	說明
保護警報(Conservation)	當電力系統存在風險時，ERCOT 將發出保護警報。在此警報期間，重要的是要節約以防止發生緊急情況
能源緊急警報 1 級(EEA1)	表示目前儲量很低，預計不會在 30 分鐘內恢復。此警報允許 ERCOT 調用所有可用電源，包括來自其他電網的電源，有輪換停電的風險
能源緊急警報 2 級(EEA2)	當儲量低於 EEA1 並且預計不會在 30 分鐘內恢復時，就會發生 2 級警報；ERCOT 可在緊急情況下關閉大型工業客戶電力，且為 ERCOT 提供額外資源

	來平衡電網，但存在輪換停電的風險
能源緊急警報 3 級(EEA3)	這是最高警報，僅作為幫助保護全州電網可靠性的最後手段發布。當儲備量極低且預計不會在 30 分鐘內恢復時，ERCOT 會採取此行動，為了幫助降低需求，ERCOT 將命令輸電公司實施輪流停電



圖、ERCOT 能源緊急警報分級示意(資料來源：ERCOT, PEC)