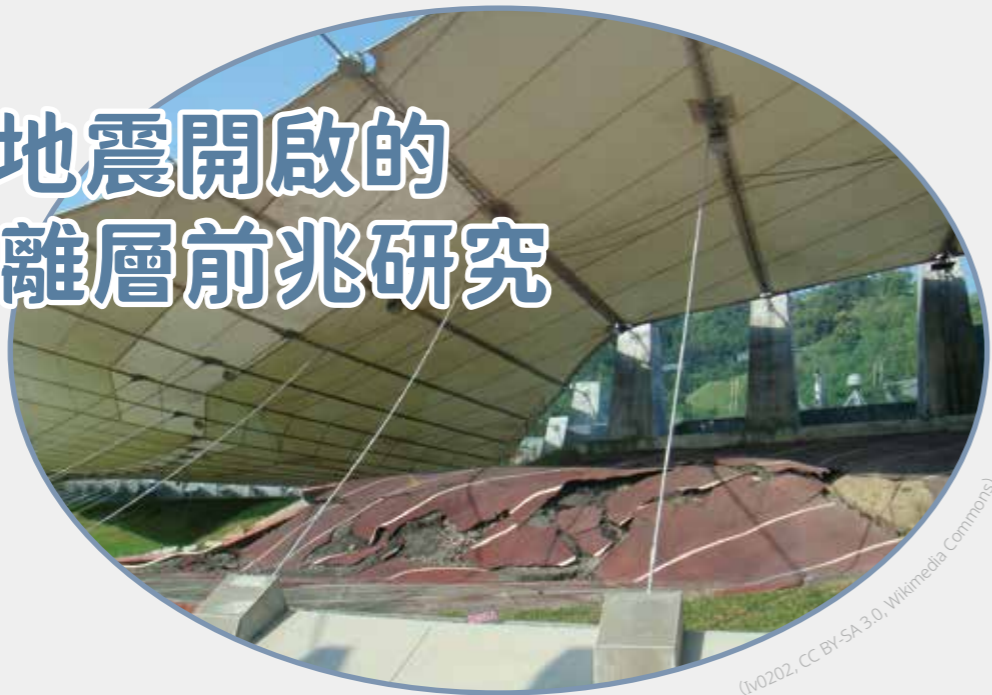


921大地震開啟的震前電離層前兆研究



劉正彥
中央大學太空科學與科技研究中心、太空與遙測研究中心、太空科學與工程學系教授。

Take Home Message

- 臺灣地震頻繁且電離層電子濃度高，研究發現臺灣約七成規模 5.0 以上的大地震發生前都有電離層電子濃度異常減少的現象。
- 921 地震前 1、3、4 天，電子濃度顯著異常減少。筆者團隊透過全球電離層圖確認此異常頻繁且集中出現於地震震央地區，而非隨機發生。
- 921 地震前震央和斷層附近的電離層電子濃度異常減少、地磁場異常向上、閃電異常頻繁，證實岩石層—大氣層—電離層的電磁耦合過程。衛星現地電漿量測說明這些異常與震央附近的西向電場有關。

臺灣位處菲律賓海板塊和歐亞板塊的交界處，受到強大的板塊擠壓，造成地殼和地底結構劇烈變化，因而頻繁發生地震，長久以來交通部氣象署紀錄了詳實的地震目錄。另一方面，臺灣位處北半球赤道異常區，電離層電子濃度幾乎是全球之冠，對於通訊、定位、導航有極大影響。因此，從 1950 年代開始，交通部電信總局使用電離層探測儀 (ionosonde, 又稱電離層高頻雷達)，每 15 分鐘例行觀察電離層 90 ~ 350 公里高的電子濃度垂直分布，並記錄電離層 F2 層層峰電漿頻率 (foF2, 也就是 F2 層層峰電子濃度的特徵頻率)。高濃度電子濃度和頻繁地震發生，使得臺灣成為研究電離層地震效應的最佳場所。

地震前電離層電子濃度異常時序變化

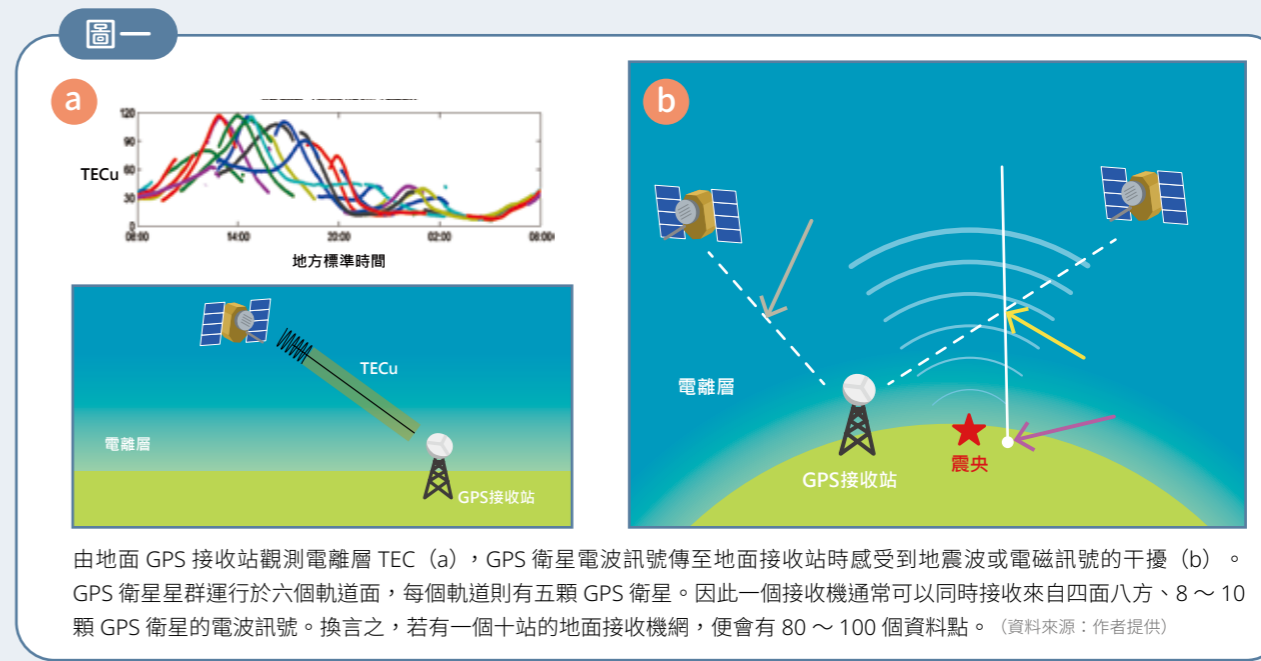
什麼是電離層地震效應？一般來說，劇烈的地表震動比較有可能影響到電離層。然而，科學家過去長期統計分析 1994 年 1 月 ~ 1999 年 8 月，共 184 筆規模 ≥ 5.0 ($M \geq 5.0$) 的地震與 foF2 資料，卻發現地震發生時、數小時到數天後都沒有明顯的 foF2 變化。反倒是

在地震前 1 ~ 5 天的下午時段，頻繁出現 foF2 顯著異常減少，以及地震規模愈大，地震前異常發生的機率也愈高等情形。有近七成 $M \geq 5.0$ 地震前出現電離層異常，而所有 $M \geq 6.0$ 地震前 1 ~ 6 天都出現電離層異常。此外，地震震央愈靠近電離層探測儀時，震前異常被電離層探測儀偵測到的機率也愈大。

這些結果說明臺灣地區 $M \geq 5.0$ 地震震前電離層 foF2 異常的特徵包含電子濃度異常減少 (負異常)、領先地震的天數為 1 ~ 5 天、出現時間為下午時段。因此在臺灣，當電子濃度於下午時段異常減少時，就有較高機會在之後的 1 ~ 5 天出現 $M \geq 5.0$ 的地震，而 25 年前的 921 地震 (又稱集集地震) 就是一個典型的例子。

集集地震引起電離層同震擾亂

全球定位系統 (global positioning system, GPS)



1999年9月21日1點47分，發生了規模7.3的集集地震。劇烈的地表震動不僅驚動了全臺灣，甚至連鄰近國家都感受到地震。臺灣地區地面GPS接收機紀錄的電離層TEC，也於地震後8~10分鐘開始出現脈衝式的擾亂。說明地震波的地表上下震動，會引發大氣波動擾亂，並以音速向上傳至太空，進而造成350公尺高的電離層產生波動擾亂。多座接收機共計偵測到14個分散於四方、振幅約為0.2~0.5 TECu (註) 的電離層擾亂。後來，科學家利用地震學的定位方法，找到地震電離層擾亂的源頭就位於集集震央東北方約30公里地表處。此結果證實岩石層—大氣層—電離層的波動耦合，震後效應造成了電離層同震擾亂。

TEC 極端異常減少，尤其在集集震央的正上空最為顯著，與中位數的差值 (ΔTEC) 約為 20~25 TECu (圖二) (註)。此一經緯二維影像的空間異常，不僅再次證實集集地震前電離層異常前兆存在，同時也開啟利用全球 TEC 搜尋全球大地震電離層異常前兆的頁章。

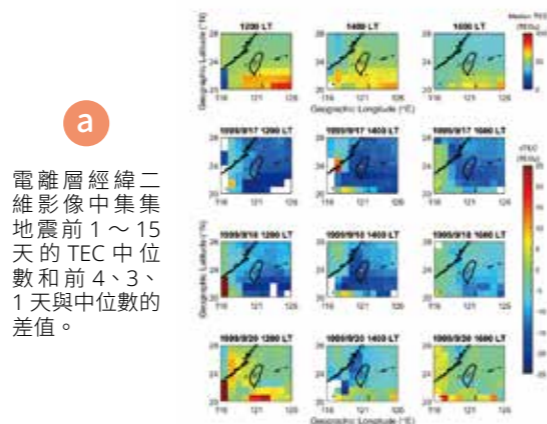
值得注意的是，同震擾亂和震前異常的物理機制完全不同。震前異常量 (20~25 TECu) 約是同震量 (0.2~0.5 TECu) 的 50~100 倍，這是由於同震擾亂的機制為機械能，震前異常則是電磁能。

TECu 表示全電子含量，是指單位面積上的電子濃度，也就是一個底面積為 1 平方公尺 (m^2)，高度無限高的柱體中所包含的電子總數。1 TECu 等於每平方公尺上有 10^{16} 個電子存在，也就是 $1 \text{ TECu} = 10^{16} \text{ \#/m}^2$ 。

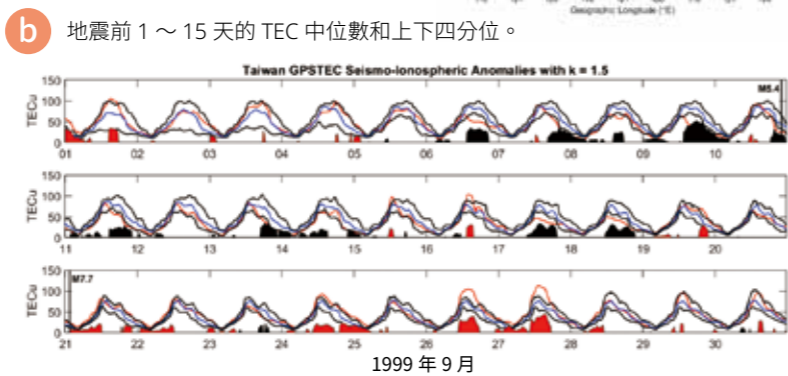
集集地震前 foF2 和 TEC 的異常

集集地震除了造成電離層同震擾亂外，在震前電離層是否也有異常發生？根據臺灣電離層探測儀的紀錄，集集地震前 1、3、4 天下午時段電離層 foF2 極端異常減少，與過去研究出的地震前電離層電子濃度異常特徵幾乎完全吻合。一般來說，同一地點的 foF2 與 TEC 有極高的相關性，集集震央上空的 TEC 也在震前 1、3、4 天下午時段異常減少。進一步檢視電離層經緯二維影像，發現

圖二 1999年9月集集震央上空的 TEC 時序變化



a 電離層經緯二維影像中集集地震前 1~15 天的 TEC 中位數和前 4、3、1 天與中位數的差值。



b 地震前 1~15 天的 TEC 中位數和上下四分位。

(Liu et al. 2001; 2004)

集集地震前的地磁與閃電落雷異常

根據整合搜尋臺灣地震前兆團隊 iSTEP (integrated Search Taiwan Earthquake Precursors) 的綜合整理，集集地震前出現的六項不同異常現象：

- (1) 地震波傳播時間的延遲
- (2) 合成孔径雷達差分干涉偵測的地表形變
- (3) 地震的時間、空間、規模分布改變
- (4) 地震地磁異常擾亂
- (5) 地震大氣層與電離層異常
- (6) 地應力餘震風險預測

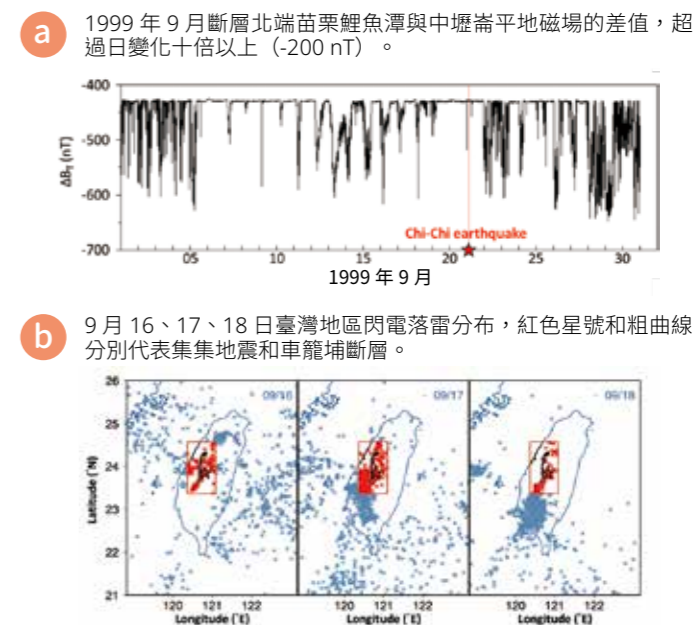
其中，震前地磁異常擾亂和地震大氣層閃電落雷異常，皆為電磁能量洩漏與釋放現象。科學家發現集集地震前 1.5~2 個月，位於車籠埔斷層北端、苗栗鯉魚潭的地磁場 (主要來自垂直地表向上分量)，就出現超過日變化十倍以上的異常，尤其是震前 4~12 天最為明顯 (圖三 a)。此外，中央氣象署閃電落雷系統也記錄到集集地震前 3~5 天 (9/16~9/18)，車籠埔斷層上方和南邊上空皆出現大量的閃電落雷現象 (圖三 b)。

集集地震前，全球 TEC 異常的空間分布

1999 年起，歐美國家陸續開始利用全世界 200 多個地面站接收全球導航衛星系統 (global navigation satellite system, GNSS) 的衛星電波訊號，並利用球諧函數建構全球電離層 TEC 圖 (Global Ionosphere Map, GIM, 又稱全球電離層圖)。科學家能藉此估計電離層電子濃度引起

圖三 921 集集地震前車籠埔斷層地磁場和閃電落雷現象

(Yen et al. 2004; Liu et al. 2015)



a 1999年9月斷層北端苗栗鯉魚潭與中壢崙平地磁場的差值，超過日變化十倍以上 (-200 nT)。

b 9月16、17、18日臺灣地區閃電落雷分布，紅色星號和粗曲線分別代表集集地震和車籠埔斷層。

的電波時間延遲效應，隨時觀察全球任何一個地方的 TEC 變化 (註)。根據集集地震前 TEC 空間異常的經驗，科學家利用 GIM TEC 發展全球搜尋技術，觀察 1999 年 M7.1 美國加州地震、2002 年花蓮 M6.8 地震、2004 年印尼蘇門答臘 M9.3 地震、2008 年中國汶川 M8.0 地震、2010 年海地 M7.0 地震、2011 年日本東北 M9.0 地震、2017 年兩伊邊境 M7.3 地震、2018 年印尼龍目島 M7.0 地震的電離層異常，結果皆成功獲得各個地震即將發生的位置。

GIM 時間和空間解析度分別為 2 小時和 2.5 緯度與 5.0 經度。每一張 GIM 可視為由 5183 (73×71) TEC 格子點組成。

雖然 GIM 曾多次被用來研究上述全球大地震的電離層地震前兆，但它迄今卻尚未被用來檢視集集

地震的電離層 TEC 減少異常。倘若 GIM TEC 減少異常仍只在臺灣地區出現，就可以確認此異常與集集地震相關。科學家分析美國國家航空暨太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 噴射推進實驗室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 公布的 GIM 全球減少異常分布，結果再次證實集集地震前 3~4 天電離層 TEC 異常減少，且只出現於集集地震的準備區域或孕震構造 (圖四)。地震位置、閃電頻繁、TEC 異常減少，再次說明岩石層—大氣層—電離層耦合於地震電離層前兆研究扮演一定的角色。

地震前 TEC 異常減少的物理機制

福爾摩沙衛星一號 (FORMOSAT-1，簡稱福衛一號) 搭載的電離層電漿電動儀器 (Ionospheric Plasma and Electrodynamics Instrument, IPEI)，能夠在現地量測衛星軌道上的電離層離子濃度、離子溫度、離子速度等數據，並被用來研究 2002 年 M6.8 花蓮地震電離層 TEC 減少異常。研究結果顯示，離子濃度與 GIM TEC 的時空異變化和異常分布完全吻合。進一步根據發電

機原理分析福衛一號離子速度，也發現離子濃度與 GIM TEC 減少異常是西向電場所引起 (註)。此外，福衛五號搭載的先進電離層探測儀 (Advanced Ionospheric Probe, AIP) 可量測紀錄離子速度，也成功計算、獲得和 2017 年兩伊邊境地震相關的電離層離子濃度，以及 GIM TEC 增加異常所伴生的東向電場。因此，造成電離層減少和增加的異常，分別可對應到西向和東向電場。由於地球磁力線可視為等電位線，意味著衛星所量測的電場是來自地震震央地區。

註 「發電機原理」即是將機械能轉成電能。例如水力發電，就是由水力推動線圈切割磁力線而產生電動勢。本文中的正離子運動 (速度) 即是一種機械能，當正離子速度行經地球磁場時，會在正交的負方向產生電場。由於地磁場是由南向北，向上/下運動的正離子會分別引發東/西向電場。

自 1962 年起，美國國防部為了監測氣象、海洋和日地環境，開啟了一系列的國防氣象衛星計畫 (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)。DMSP 的衛星每日在地方標準時 (local time, LT) 的 18:00 和 06:00 於全球現地量測電子密度和離子向上漂移速度等 (圖五)。近日發現，

DMSP 現地量測到的電子密度曾於 921 集集地震震央上空的震前 1、3、4 天下午時段顯著異常減少，而且與電離層探測儀 foF2 和地面 GPS 接收機 TEC，以及全球電離層圖 GIM TEC 的數據都相互吻合。此外，DMSP 衛星數據顯示，集集地震前 1、4 天震央上空的離子速度出現顯著向下漂

移，說明 TEC 異常減少主要是由每公尺 0.25~0.5 毫伏特 (mV/m) 的西向電場所引起。

斷層附近異常頻繁的落雷、僅在震央上空出現的全電子含量和電子濃

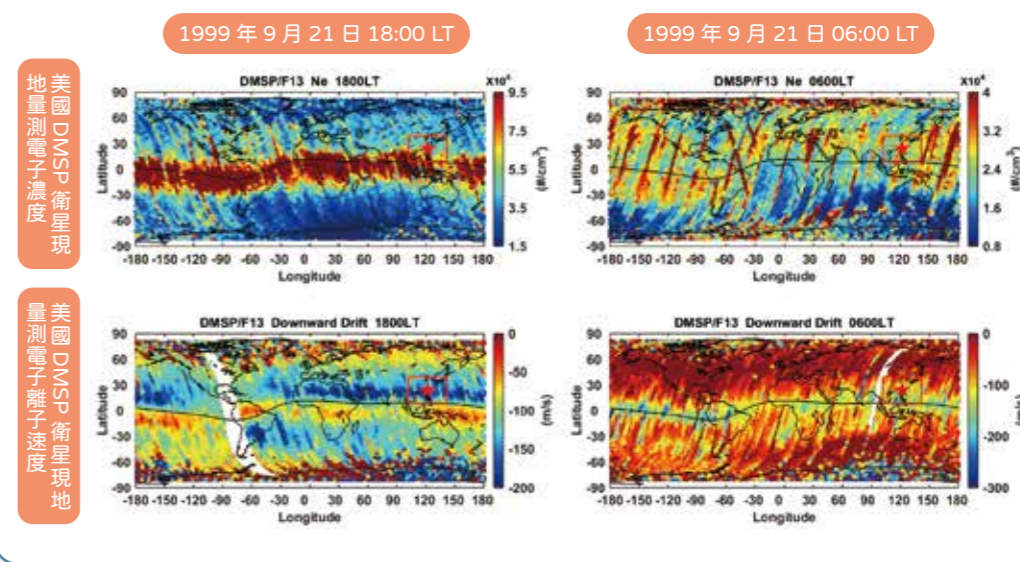
度減少異常、衛星現地量測的西向電場，說明在集集地震發生前，震央附近的地底電磁環境產生巨大變化，進而增大地表電導率，同時引發近地表西向電場，使近地表電場又沿地球磁力線傳至電離層，並造成電子濃度異常減少。此一連串的觀測證據整合呈現地震前的岩石層—大氣層—電離層的電磁耦合過程。

結合時間、空間監測 預估地震的發生

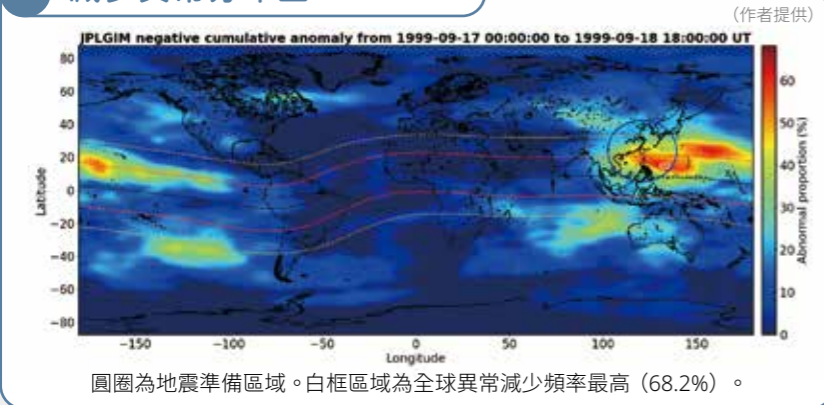
集集地震的案例，開啟利用 GNSS 研究地震前電離層 TEC 異常的研究大門。長時間大量統計研究某一地區地震與 TEC 變化的關係，可以獲知該地區地震前電離層異常的特徵，包含異常極性 (增加或減少異常)、異常領先地震天數、異常持續時間、異常出現於一天中的時段等。因此，當觀測到的異常與統計獲得的特徵相互吻合時，意味著地震有相當高的機率會在幾天後發生。這種於某一地區，藉由長時間統計獲得的特徵，一窺即將發生地震的方式稱為「時間異常監測」。

圖五 | 921 集集地震當天的電子濃度和離子速度

(作者提供)



圖四 集集地震前全球 GIM TEC 減少異常分布圖



我們可以進一步利用 GIM 的 5183 個觀測資料點同時觀察異常的分布，當符合特徵的異常僅僅出現於某一監測小區域時，就幾乎可以確認該地區可能即將有地震發生，這種方式則稱之為「空間異常監測」。結合時間與空間監測，則可預估即將來臨地震的三要素：時間、規模、位置。

此外，基於電漿物理與發電機原理，藉由衛星現地量測離子速度，可知道引起震前電離層異常的物理機制。未來若能結合全球電離層規範 (global ionospheric specification, GIS) 電子密度同化模式，以及衛星星群現地量測離子速度數據、人工智慧技術，將可令地震電離層前兆研究進入另一個新紀元。

延伸閱讀

- Liu, J. Y. et al. (2001). Tsai, Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake, *Geophysical Research Letters*, 28, 1383-1386.
- Liu, J. Y. et al. (2004). Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement, *Annales Geophysicae*, 1585-1593.
- Liu, J. Y. et al. (2006). A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly, *Journal of Geophysical Research*, 111, A05304.