

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 地球科學科

第一名

040506

震到電離層

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 張郁佳	指導老師： 吳育雅
---------------	--------------

關鍵詞：電離層、地震、太陽活動

震到電離層

摘要

以疊圖的方式累積 1999 年 9 月每天 GPS 全電子含量(TEC)，採用前 15 天 TEC 中位數當作背景參考值，探討電子濃度的增加或減少，且以標準差檢驗確認其異常現象的程度。此外進一步以 GIM 資料來做驗證，但因 GIM 的時間及空間解析度不如 GPS 觀測資料好、其資料空白處用模式關係補白，且台灣地區面積較小等因素，再次檢驗效果不彰。

此外分析電離層 TEC 異常是否與太陽活動性有關，選取相似 921 集集地震發生時的太陽黑子數為 2003 年 1 月，對照兩者前後時間的 TEC，以了解相同等級的太陽活動性是否造成電離層 TEC 異常現象。結果顯示，2003 年不論以前 15 天或後 15 天 TEC 中位數為背景參考值，皆無異常現象發生。

排除太陽活動的影響，集集地震期間電子濃度值異常減少極可能來自於地震的影響。

壹、研究動機

北京時間 2008 年 5 月 12 日 14 時 28 分發生 Mw 8.3 的汶川大地震，災情十分慘重。令人不禁想起 1999 年的 921 集集大地震，當時的恐懼、不安，仍深刻地留在心中。位於環太平洋火山地震帶上台灣的我們，無時無刻不經歷大大小小的地震，但也只能被動地接受它們的到來，難道我們真的束手無策嗎？有趣的是，921 集集大地震和 512 汶川大地震發生前夕，其附近上空的電離層電子濃度都有明顯的下降，這現象究竟是來自於太陽磁暴，還是其他如地球板塊擠壓累積能量等因素，會使得電離層電子濃度如此異常？一直以來，地震前兆的研究是科學家們非常感興趣的一門領域，但在多年的探討下，所得卻寥寥無幾。電離層電子濃度的異常現象，能不能使這長期撲朔迷離的領域露出一道曙光？

貳、研究目的

- 一、了解 921 集集大地震與電離層電子濃度變化之關係
- 二、比較相同磁緯、相同地方時的電離層電子濃度
- 三、探討相似太陽黑子數相似時期電離層的電子濃度
- 四、探討電子濃度的變化與地震震央、斷層位置之關係

參、研究設備及器材

- 一、全球定位系統(Global Positioning System, GPS)、
全球電離層圖(Global Ionosphere Maps, GIM)

二、軟體：Matlab、UltraEdit-32、Microsoft Office 2003

三、硬體：個人電腦

肆、研究過程或方法

一、文獻探討

(一)電離層

1.電離層

電離層位處距地球表面約五十公里以上至數千公里之間，存在大量自由電子和離子而會影響電波傳播，使其發生傳播速度、折射、反射、散射、極化和吸收變化。電離層中的電漿主要來自於大氣層中的中性粒子受到太陽光短波輻射游離化而產生，然而其亦可經由電子與離子的結合而消失，或經傳輸作用而改變。

2.分層

(1) D層(最低的一層)

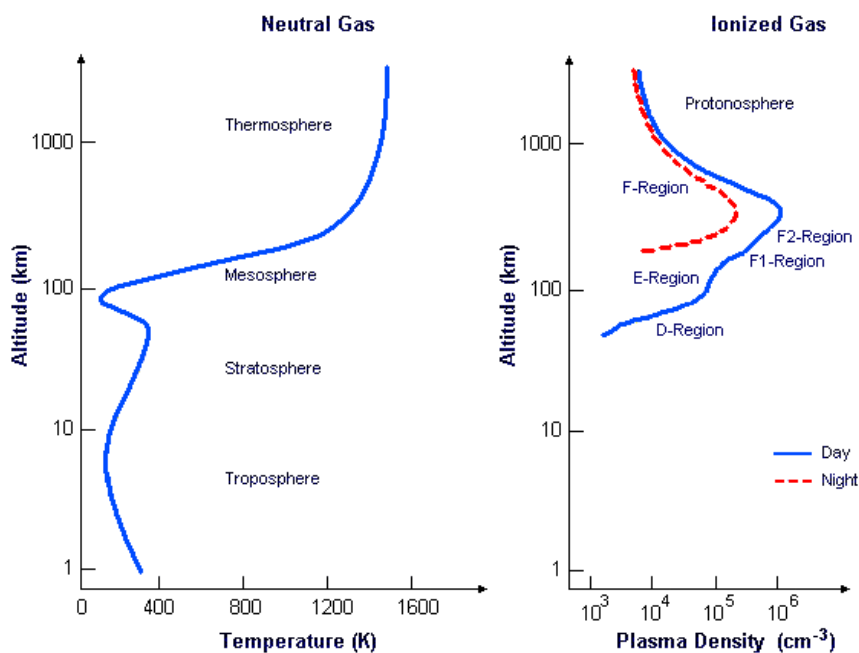
約在50-90公里高而白天電子濃度甚小，約為 $2.5 \times 10^9 \text{ el/m}^2$ 。

(2) E層(中層)

約在100-140公里高，白天濃度約 10^{11} el/m^2 ，晚上因無太陽光之光化學反應，電子濃度幾乎難以探測。

(3) F層

約在150-400公里高，因傳輸作用而帶有最多的電漿濃度約 $2.0 \times 10^{12} \text{ el/m}^2$ ，白天分為F₁與F₂層，夜間則合併為一個層。



圖左為地球大氣層溫度隨高度之分布。圖右為電離層電子濃度隨高度之分布圖，橫座標為電子濃度，縱座標為高度。白天電離層(藍色實線)可分為 D、E、F₁ 與 F₂ 層，夜晚(紅色虛線)則只有 F 層。

3.異常

(1)冬季異常

夏季因陽光直射中緯度地區，F₂ 層在白天電離度加高，然而由於季節性氣流的變化，夏季這裡的分子對單原子的比例也增高，造成離子捕獲率的增高，這個捕獲率的增高甚至強於電離度的增高。因此形成夏天電離層電子濃度低於冬天，此現象成爲冬季異常。

(2)赤道異常(equatorial ionization anomaly, EIA)

電離層F層在地磁赤道地區存在有明顯電漿濃度減少的現象，而於磁赤道兩側約20°附近卻形成兩個電漿濃度峰值。

4.擾亂

電離層之電子濃度可能會受到太陽風、磁暴、雷暴雨、中性風等的影響而造成其濃度改變。

(二)全球定位系統(Global Positioning System, GPS)

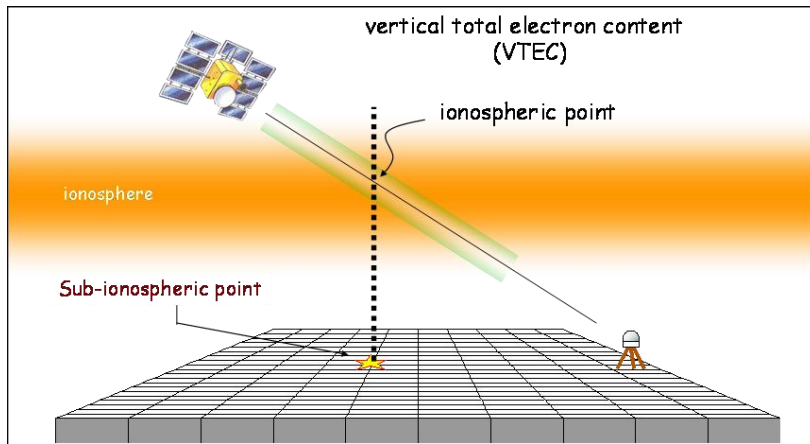
每一顆GPS衛星傳送兩種頻率的電波($f_1=1575.42$ MHz與 $f_2=1227.60$ MHz)，並在其上調制兩種不同的電碼(C/A與P)以編制，而在接收器端記錄虛擬距離(pseudo range)與載波相位(carrier phase)。因電離層爲一個頻散的介質(dispersive medium)，GPS衛星訊號通過時會造成電磁波速度的改變。其載波相位的超前和虛擬距離資料的延遲，與通過電離層路徑上電子濃度的積分成正比。因此利用此特性可以估算GPS衛星至地面接收站之間傳播路徑上(Slant)的全電子含量STEC：

$$STEC \equiv \int_{R_x}^{T_x} N(l) \cdot dl$$

此式說明STEC爲電子密度N從GPS衛星發射天線Tx至地面接收天線Rx的路徑積分。(全電子含量(total electron content, TEC)單位：1TECU= 10^{16} el/m²)

GPS衛星電波穿越電離層的路徑長度會隨著GPS衛星的移動而改變，因此STEC會隨著衛星的仰角而變。爲除去電波幾何路徑的效應，衛星觀測電離層時通常會進行幾何垂直修正，將STEC換算成垂直方向上的vertical TEC (VTEC)。假設GPS衛星發射訊號通過電離層的質心，即含最大電子濃度上方附近之電離層點(ionospheric point)，而與地面接收站之間存在天頂角 χ 。電離層點在地面上的投影則稱爲「亞電離層點」(sub-ionospheric point)。亞電離層點上的VTEC可表示成：

$$VTEC \approx STEC \times \cos \chi$$



STEC 與 VTEC (陳佳宏, 2006)

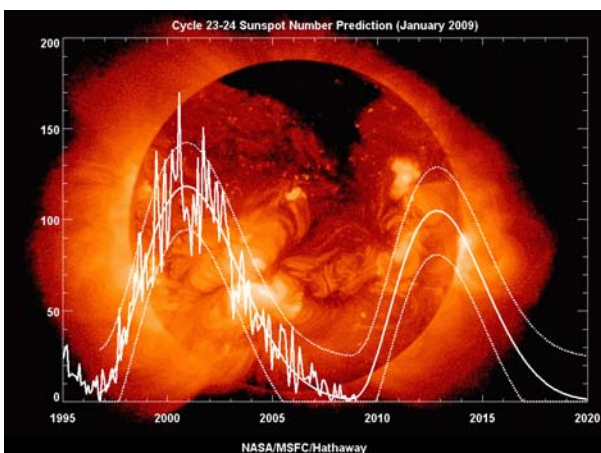
(三)全球電離層圖(Global Ionosphere Maps, GIM)

為歐洲軌道測定中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)利用散佈於全球大約200個GPS/GLONASS地面觀測站以及其他儀器的觀測資料，計算每天全球電離層TEC分佈而得，以提供全球電離層全電子含量的分布狀況。現今GIM之時間解析度為2小時，而經度和緯度解析度則分別為5°和2.5°。

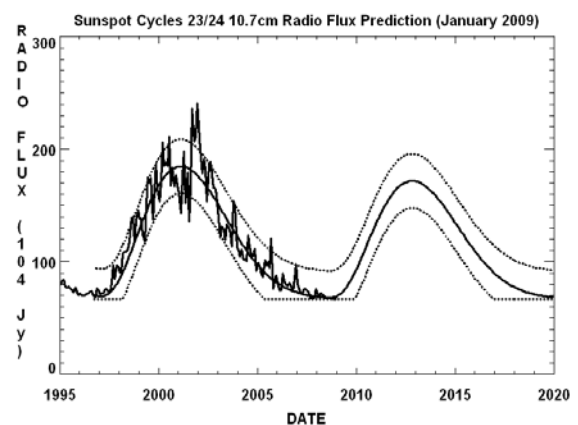
(四)太陽黑子數與 F10.7

太陽黑子數與F10.7指數常被用來描述太陽活動性。太陽黑子是在太陽的光球層上發生的一種太陽活動。一般認為，太陽黑子實際上是太陽表面一種熾熱氣體的巨大漩渦，溫度大約為4500°C。因為比太陽的光球層表面溫度要低1000到2000°C，所以看上去像一些深暗色的斑點。其形成與太陽磁場有密切關係。黑子的活動周期為11.2年，活躍時會對地球的磁場產生影響。

F10.7指數是依據加大拿首都渥太華至今連續觀測2800MHz波段太陽電磁波之強度，單位為 $10^{22} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$ 。太陽電波通量來自太陽的無線電波，主要出自日冕活躍區上面被磁場拘束住的電漿。被標示為F10.7的為波長10.7公分的無線電波，接近被觀察的太陽無線電波的峰值位置。



太陽黑子 (NASA)



F10.7 (NASA)

(五) Mw 矩陣級(moment magnitude scale)

為記錄地震強度的標度。

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 6$$

其中地震矩 $M_0 = \mu \times \bar{D} \times S$ (μ 為斷層物質之剛性係數(rigidity 或 modulus) 一般為 30×10^9

帕斯卡。 \bar{D} 為斷層之平均滑動量(位移)。 S 為斷層面積。)

(六)地震前電離層電子濃度減少，目前有三種假設最為科學界所接受：

1.重力波理論：

地震前，地表微細變化常會引起大氣極低頻振動，並顯現於距地表 80 公里左右之電離層電子濃度變化中。

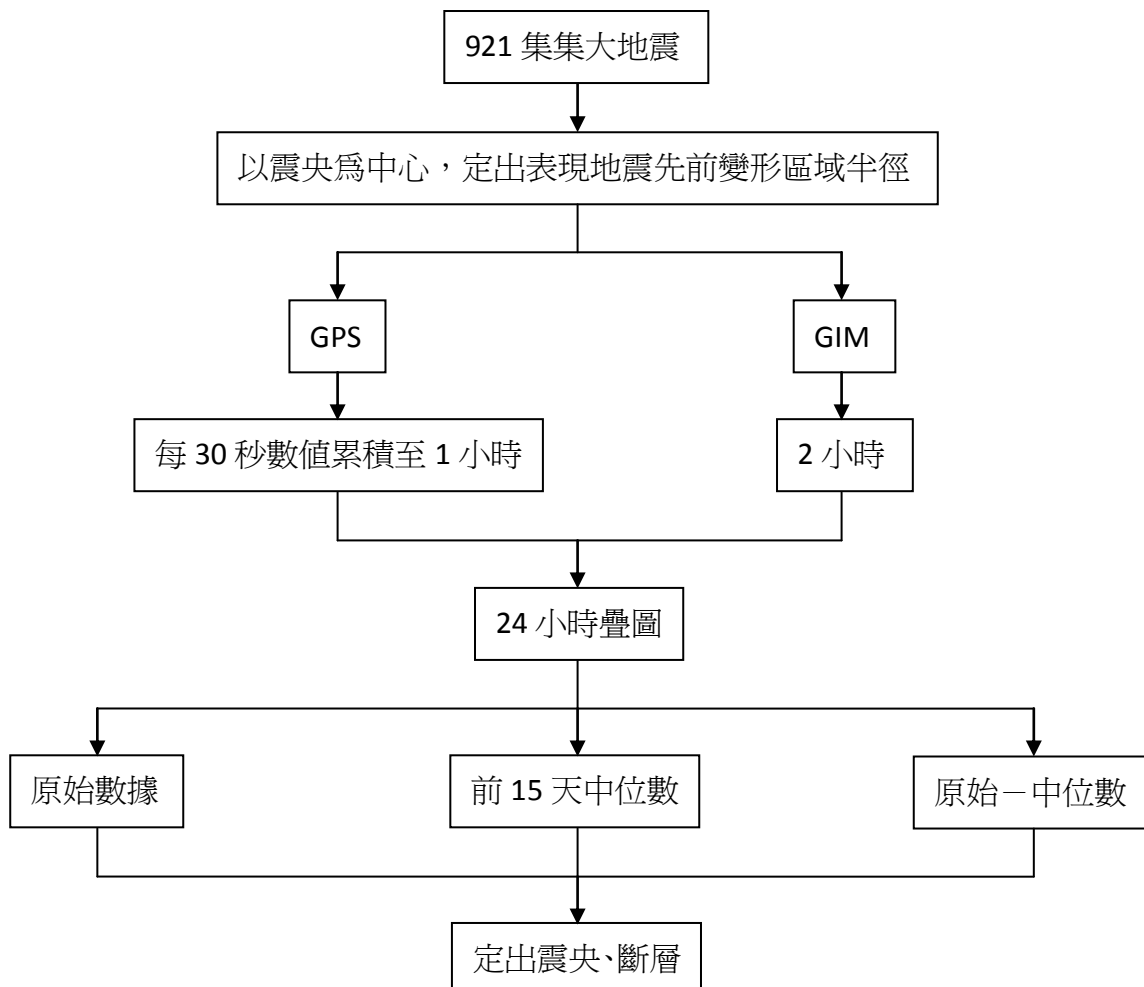
2.地殼化學理論：

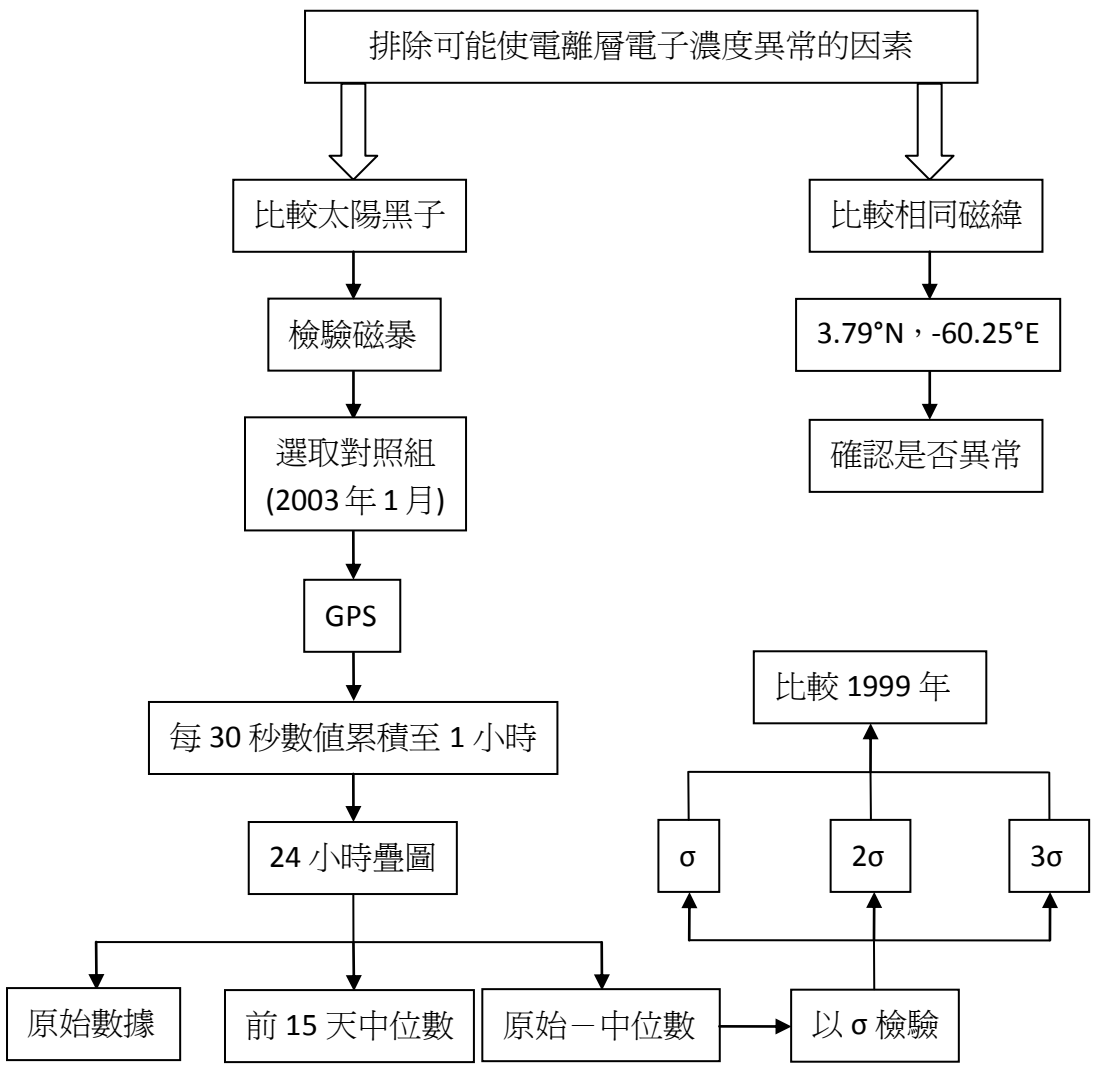
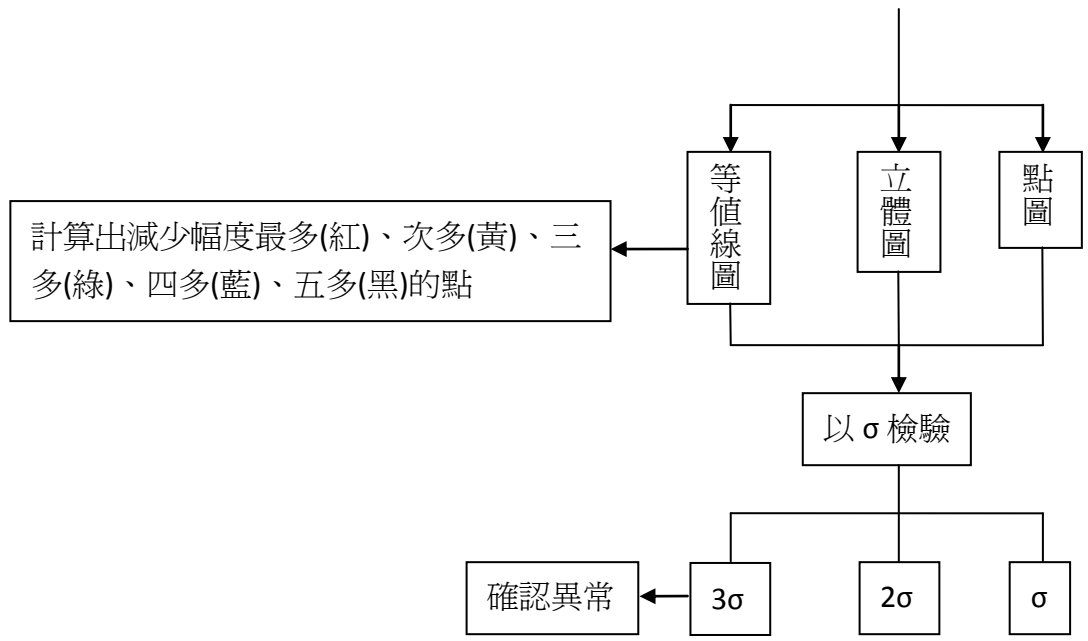
地震前，地殼會大量釋放出各種氣體而擴散於大氣中，並進入電離層，而引起電子濃度之變化。

3.地電磁場理論：

地震前，氣體、地殼擠壓或微小振動，會引起地電及地磁場的變化，產生的電磁場變化又進一步感應大氣及電離層中之帶電粒子而引起異常。

二、研究過程及方法

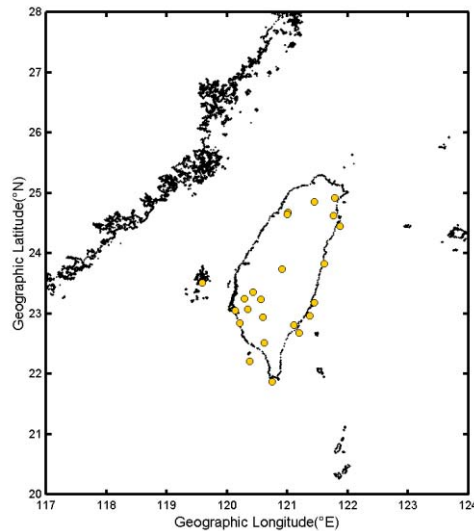




(一)921 集集大地震前後電離層電子濃度之變化

1.以 GPS 分析

- (1)以地震震央(23.85°N, 120.82°E)為中心，定出有效地表現地震先前變形區域半徑(應變半徑) $R=10^{0.43M}$ (M 為地震規模)，將 M 以 7.3 帶入，得一半徑為 1377.2 公里的圓
- (2)1999 年台灣地區共有 25 個 GPS 測站(如下圖)，將 GPS 電碼轉觀測值經由理論數學換為電離層全電子含量(TEC)數值($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$)



- (3)以 Matlab 將每 30 秒一筆之數值累積至 1 小時
- (4)以 Matlab 將一天 24 小時有資料各點作疊圖，取出其中位數，放入第一張子圖 (Color Bar 範圍：25~100 ($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$))
- (5)計算前 15 天 TEC 中位數，以與上述相同方法將有資料各點作疊圖，再取出其中位數，放入第二張子圖 (Color Bar 範圍：25~100 ($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$))
- (6)將第一張子圖(原始數據)減去第二張子圖(前 15 天 TEC 中位數)，放入第三張子圖 (Color Bar 範圍：-45~25 ($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$))
- (7)定出各圖震央與斷層的位置

2.以 GIM 分析

- (1)以地震震央(23.85°N, 120.82°E)為中心，定出地有效地表現地震先前變形區域半徑(應變半徑) $R=10^{0.43M}$ (M 為地震規模)，將 M 以 7.3 帶入，得一半徑為 1377.2 公里的圓
- (2)取得 1999 年 GIM 資料(經度解析度為 5°，緯度解析度為 2.5°)
- (3)將一天 24 小時共 12 筆數據(時間解析度為 2 小時)作疊圖，取出其中位數，放入第一張子圖 (Color Bar 範圍：0~30 ($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$))
- (4)計算前 15 天 TEC 中位數，以與上述相同方法作疊圖，再取出其中位數，放入第二張子圖 (Color Bar 範圍：0~30 ($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$))
- (5)將第一張子圖(原始數據)減去第二張子圖(前 15 天 TEC 中位數)，放入第三張子圖 (Color Bar 範圍：-15~10 ($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$))
- (7)定出各圖震央與斷層的位置

(二)以標準差 σ 檢驗其是否為異常

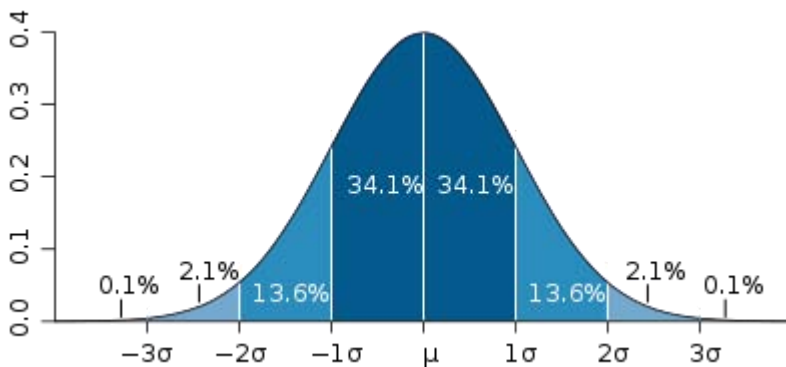
假設有一組數值 X_1, X_2, \dots, X_n (皆為實數)，其平均值為：

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (N \text{ 為數值的個數})$$

此組數值的標準差為：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$$

考慮一組數據具有相似於常態分布的機率分布。若其假設正確，則約 68% 數值分布在距離平均值有 1 個標準差之內的範圍，約 95% 數值分布在距離平均值有 2 個標準差之內的範圍，約 99.7% 數值分布在距離平均值有 3 個標準差之內的範圍。



平均值小於一個標準差(深藍)之內的數值範圍約占全部數值的 68%，兩個標準差之內(深藍+藍)約 95%，三個標準差之內(深藍+藍+淺藍)約 99.7%。

- 1.將之前所畫之一天電離層濃度疊圖放入第一張子圖
- 2.為避免某點資料過少而造成以 σ 檢驗時無法除去該點，因此以程式判定先行剔除資料少於 9 筆的點。
- 3.以電腦程式判定，剔除數值小於 1 個 σ 的點，放入第二張子圖
- 4.依上述方法，剔除數值小於 2 個 σ 、3 個 σ 的點，分別放入第三、四張子圖

(三)下降幅度較多的點

- 1.將之前所作之異常日(9/17、9/18)電離層濃度疊圖畫為等值線圖
- 2.以程式判定剔除資料少於 9 筆的點
- 3.以(原始數據-前 15 天 TEC 中位數)差值判定下降幅度前 5 名的地點，依次以紅、黃、綠、藍、黑點標示之

(四)相同磁緯、Local Time 之比較

- 1.以 GIM 資料，取震央(23.85°N, 120.82°E)上空電離層電子濃度作一圖，包含九月份原始數據、前 15 天 TEC 中位數、上界異常值、下界異常值
- 2.找出與震央(磁經緯：13.83°N, 191.86°E)相同磁緯、磁經相差 180°之點
- 3.以 GIM 資料，取此點(3.79°N, -60.25°E)上空電離層電子濃度作一圖，包含九月份原始數據、前 15 天 TEC 中位數、上界異常值、下界異常值

(五)F10.7 相近 2003 年 1 月之比較

- 1.比較與 1999 年 9 月(黃色)之 F10.7 數值較相近的時間

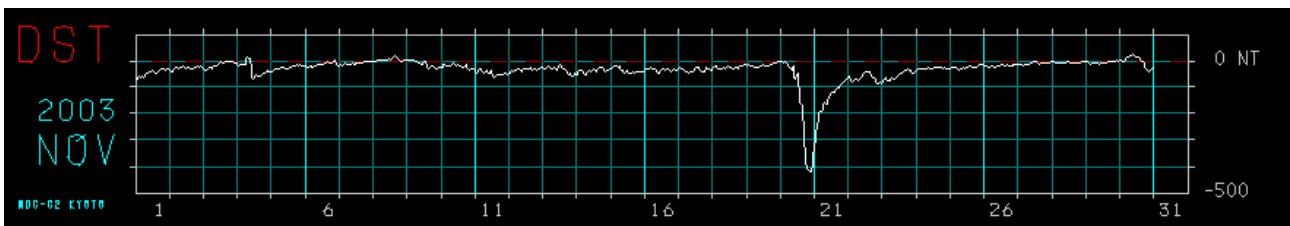
MONTHLY	ADJUSTED MONTHLY SOLAR FLUX	MONTHLY
Ottawa/Penticton	2800 MHz Series C (Multiplied by Ten)	1700/2000 UT

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1999	1381	1386	1249	1180	1519	1752	1710	1750	1372	1637	1874	1645
2000	1531	1691	2061	1855	1887	1855	2114	1672	1838	1666	1749	1682
2001	1613	1431	1761	1793	1520	1792	1356	1671	2362	2066	2081	2282
2002	2201	2001	1784	1911	1824	1534	1792	1884	1778	1659	1651	1523
2003	1394	1214	1308	1272	1187	1334	1319	1252	1134	1501	1377	1114
2004	1104	1044	1110	1019	1021	1005	1224	1127	1041	1051	1112	921
2005	990	949	890	866	1017	966	996	928	921	761	844	879
2006	808	747	747	896	827	790	783	814	786	738	844	819
2007	808	758	715	729	760	760	740	709	678	671	681	761
2008	719	694	722	707	699	680	678	680	678	678	671	670
2009	676											

(出處：http://www.swpc.noaa.gov/forecast_verification/F10.html)

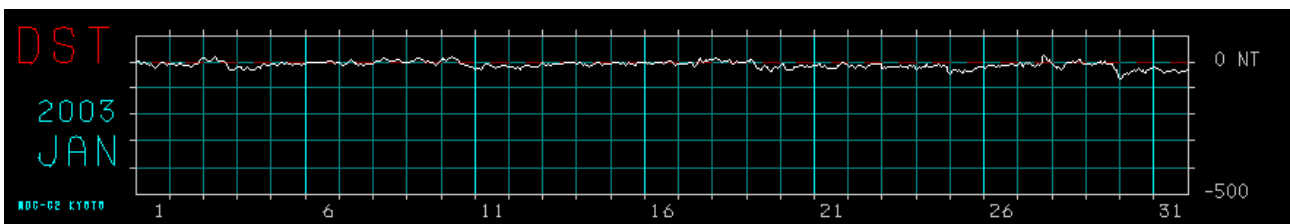
(1)檢查太陽活動的影響

- a. 2003 年 11 月份(紅色)月平均最接近 1999 年 9 月，但發現有明顯的磁暴現象，因此不予採用



(出處：<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>)

- b. 2003 年 1 月份(綠色)月平均次接近 1999 年 9 月，檢查太陽活動的影響，無明顯的磁暴現象，因此將 2003 年 1 月作為對照組



(出處：<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>)

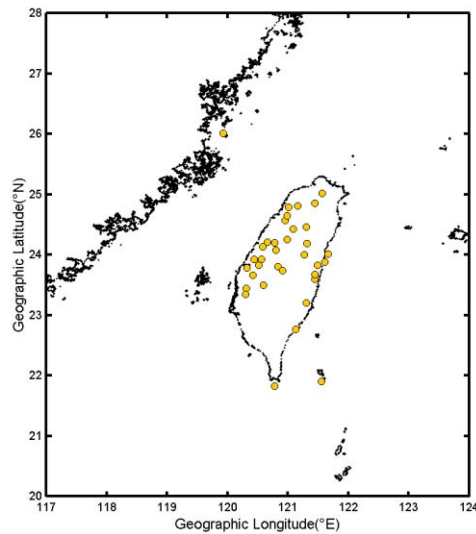
- (2)找出與異常日 1999 年 260、261 日(9/17、9/18)相近之 F10.7 數值得 2003 年 006、007 日(01/06、01/07)

1999	260	261								
	1591	1530								
2003	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010
	1112	1144	1331	1382	1432	1568	1578	1680	1769	1787

	011	012	013	014	015	016	017	018	019	020
	1826	1677	1662	1586	1450	1399	1371	1330	1261	1337
	021	022	023	024	025	026	027	028	029	030
	1294	1254	1316	1258	1249	1212	1177	1218	1207	1176
	031									
	1169									

(出處：http://www.swpc.noaa.gov/forecast_verification/F10.html)

2.2003 年台灣地區共有 45 個 GPS 測站(如下圖)，將其 GPS 電碼觀測值轉換為 TEC 數值

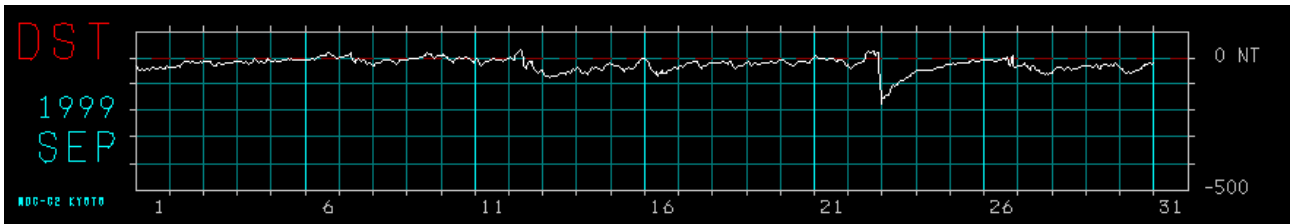


- 3.以 Matlab 將每 30 秒一筆之數值累積至 1 小時
- 4.以 Matlab 將一天 24 小時有資料各點作疊圖，取出其中位數，放入第一張子圖 (Color Bar 範圍：25~100 ($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$))
- 5.計算前 15 天 TEC 中位數，以與上述相同方法將有資料各點作疊圖，再取出其中位數，放入第二張子圖 (Color Bar 範圍：25~100 ($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$))
- 6.將第一張子圖(原始數據)減去第二張子圖(前 15 天 TEC 中位數)，放入第三張子圖 (Color Bar 範圍：-45~25 ($10^{16}\text{el}/\text{m}^2$))
- 7.以標準差檢驗 2003 年 006、007 天是否異常
 - (1)將之前所畫之一天電離層濃度疊圖放入第一張子圖
 - (2)為避免某點資料過少而造成以 σ 檢驗時無法除去該點，因此以程式判定先行剔除資料少於 9 筆的點。
 - (3)以電腦程式判定，剔除數值小於 1 個 σ 的點，放入第二張子圖
 - (4)依上述方法，剔除數值小於 2 個 σ 、3 個 σ 的點，分別放入第三、四張子圖

伍、研究結果

(一)921 集集大地震前後電離層濃度之變化

1999 年 9 月太陽活動



(出處：<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>)

以 GPS(左半)和以 GIM(右半)分析之比較

每一張圖包含六張子圖。上左為當天原始的 TEC 數值，上中為前 15 天 TEC 中位數，上右則為(原始的 TEC 數值)－(前 15 天 TEC 中位數)。下三張子圖由左至右分別為下一天的原始的 TEC 數值、前 15 天 TEC 中位數、(原始的 TEC 數值)－(前 15 天 TEC 中位數)。

(紅色星號為震央位置)

Origin
原始數據

GPS
Median
中位數

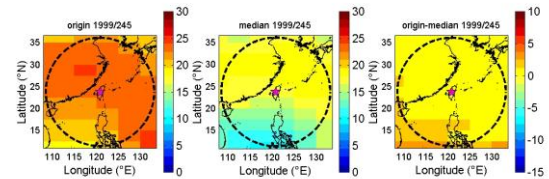
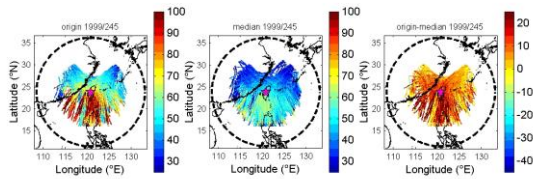
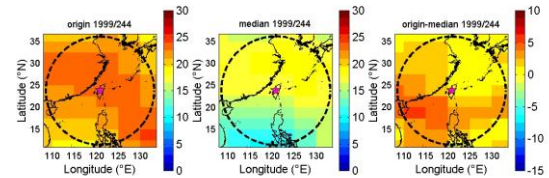
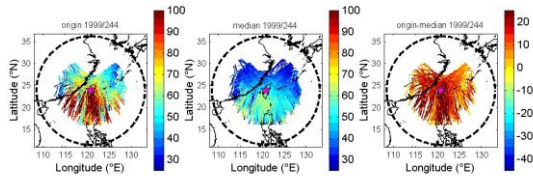
Origin-Median
原始-中位數

Origin
原始數據

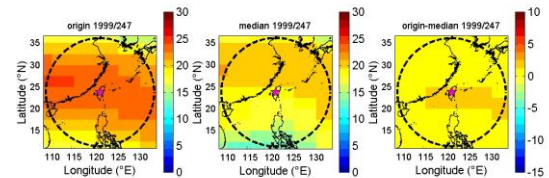
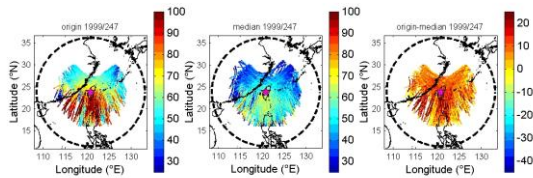
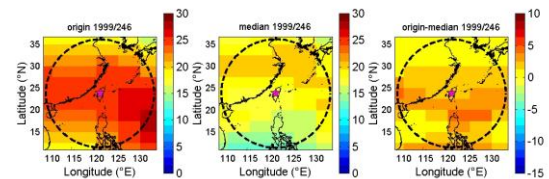
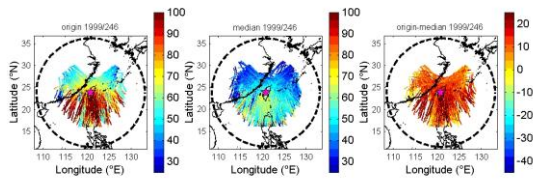
GIM
Median
中位數

Origin-Median
原始-中位數

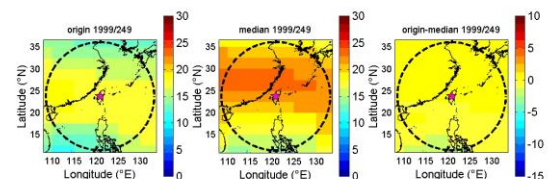
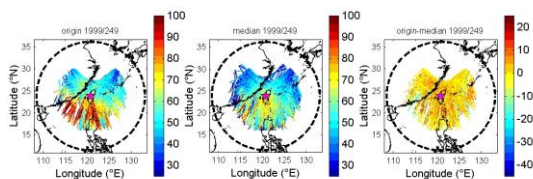
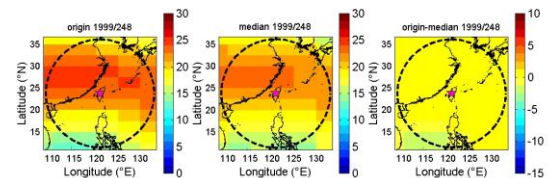
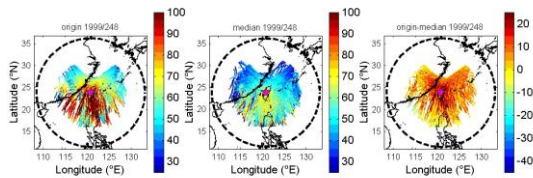
1999/09/01、1999/09/02(UT)



1999/09/03、1999/09/04(UT)



1999/09/05、1999/09/06(UT)



Origin
原始數據

GPS
Median
中位數

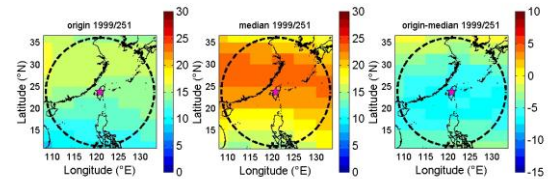
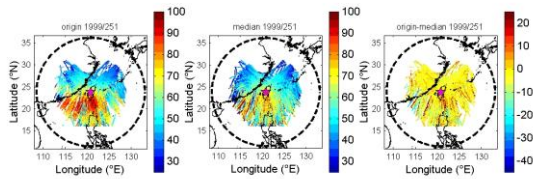
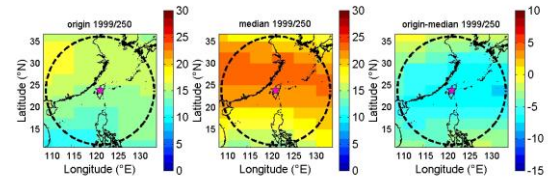
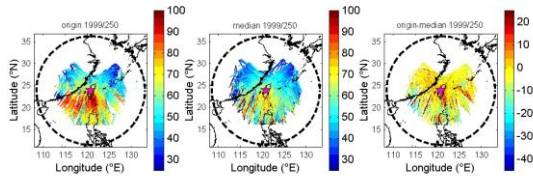
Origin-Median
原始-中位數

Origin
原始數據

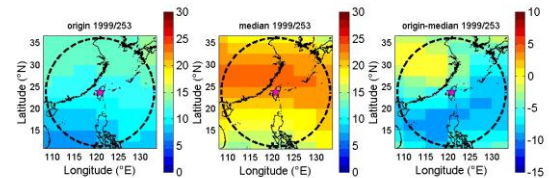
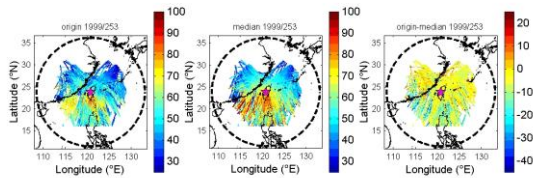
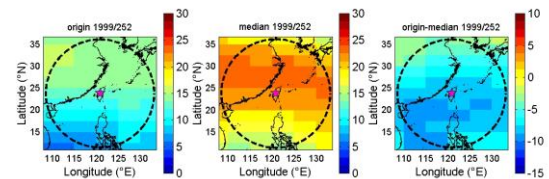
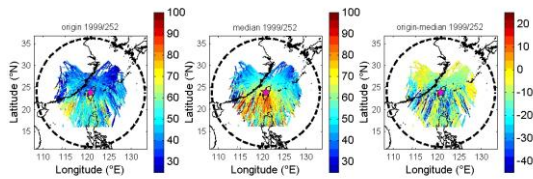
GIM
Median
中位數

Origin-Median
原始-中位數

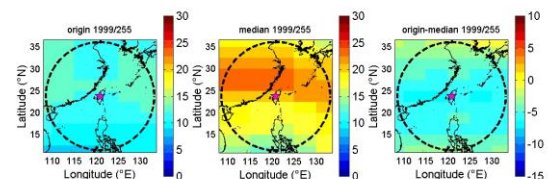
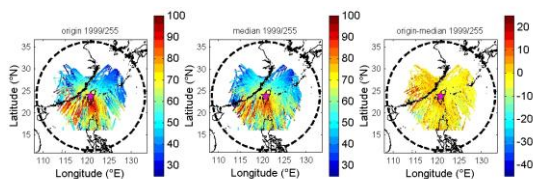
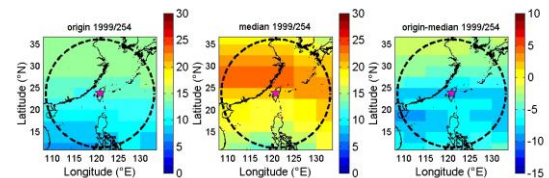
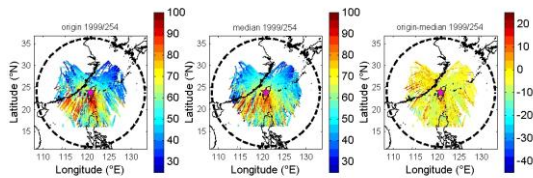
1999/09/07、1999/09/08(UT)



1999/09/09、1999/09/10(UT)



1999/09/11、1999/09/12(UT)



Origin
原始數據

GPS
Median
中位數

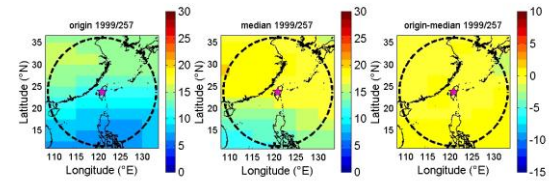
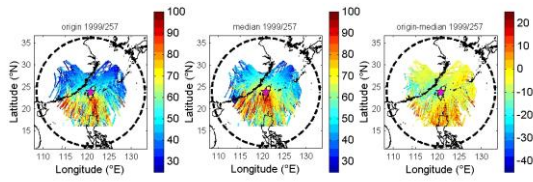
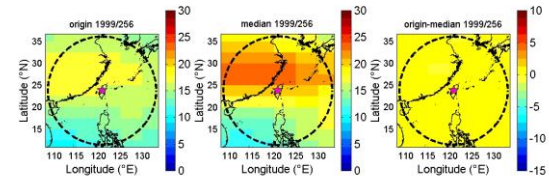
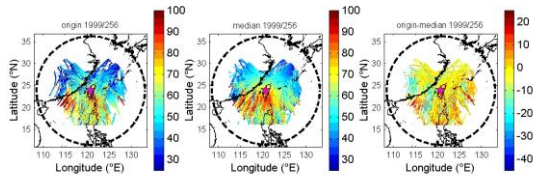
Origin-Median
原始-中位數

Origin
原始數據

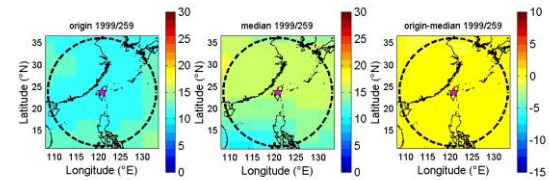
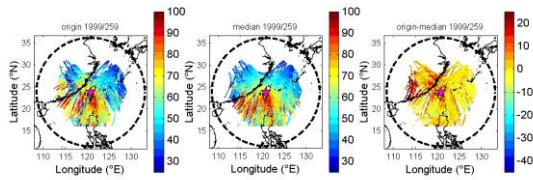
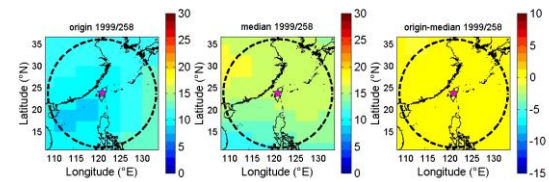
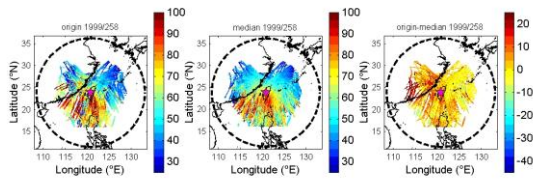
GIM
Median
中位數

Origin-Median
原始-中位數

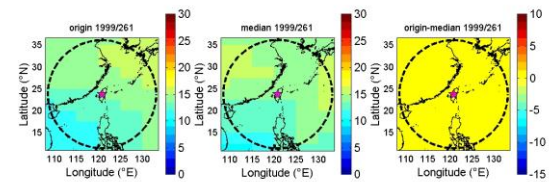
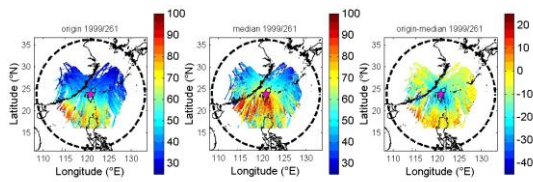
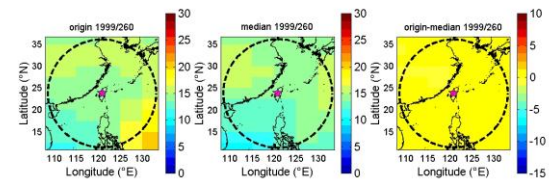
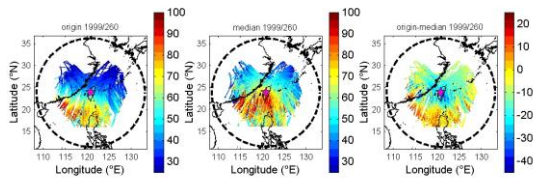
1999/09/13、1999/09/14(UT)



1999/09/15、1999/09/16(UT)



1999/09/17、1999/09/18(UT)



Origin
原始數據

GPS
Median
中位數

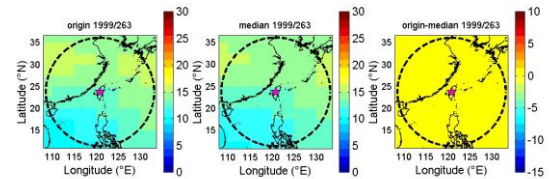
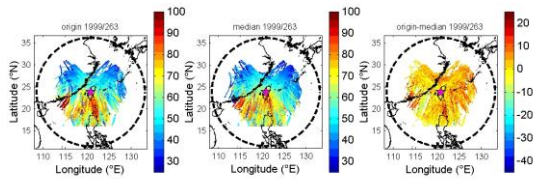
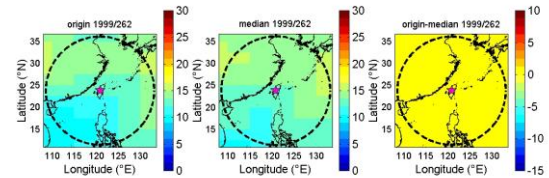
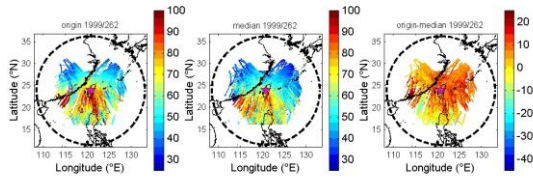
Origin-Median
原始-中位數

Origin
原始數據

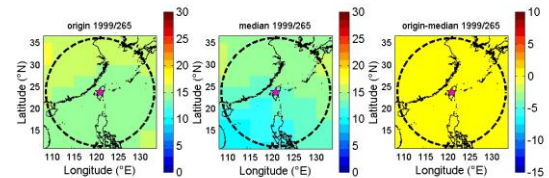
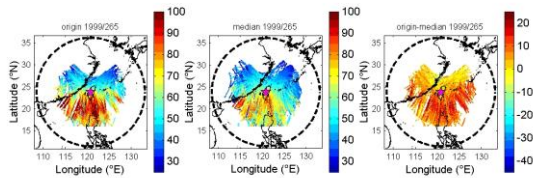
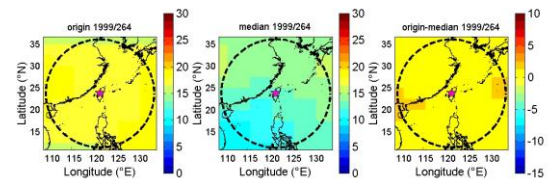
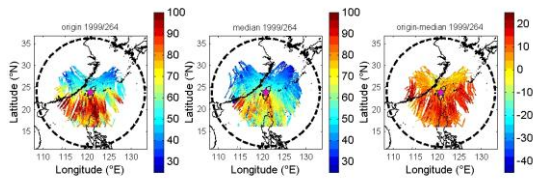
GIM
Median
中位數

Origin-Median
原始-中位數

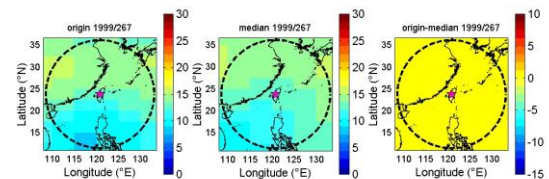
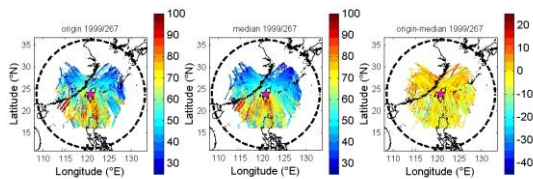
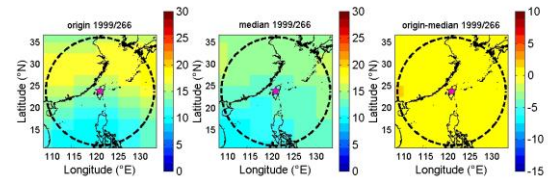
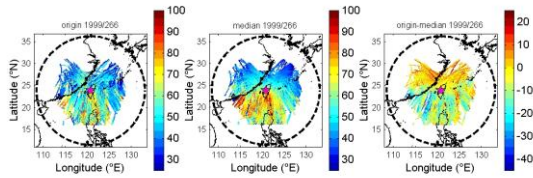
1999/09/19、1999/09/20(UT)



1999/09/21、1999/09/22(UT)



1999/09/23、1999/09/24(UT)



Origin
原始數據

GPS
Median
中位數

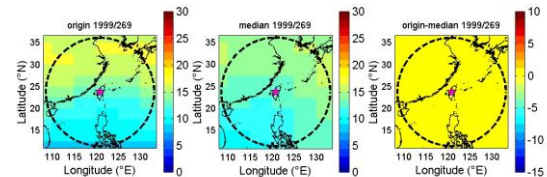
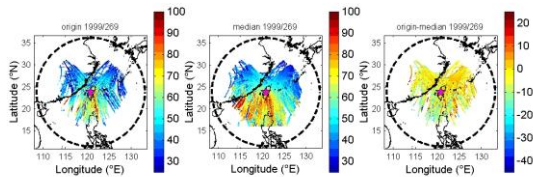
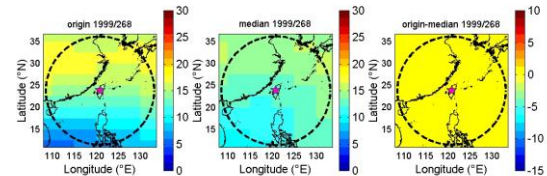
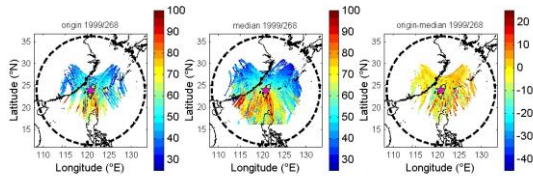
Origin-Median
原始-中位數

Origin
原始數據

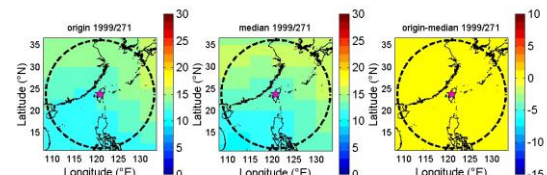
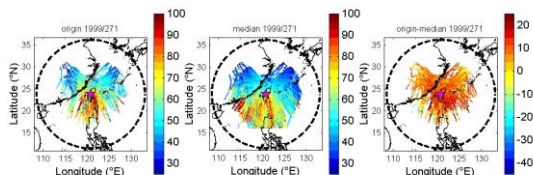
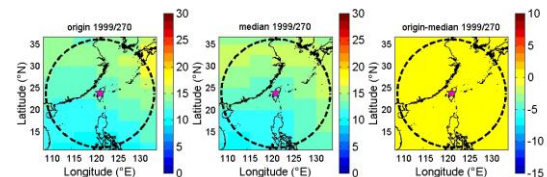
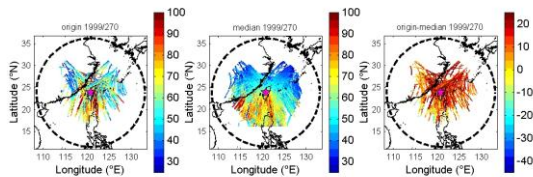
GIM
Median
中位數

Origin-Median
原始-中位數

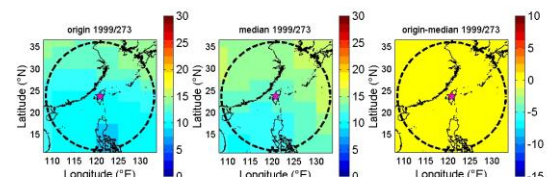
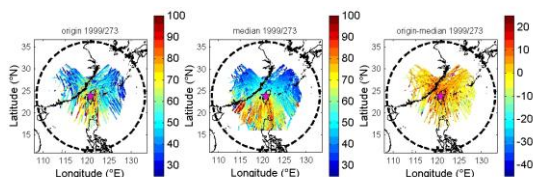
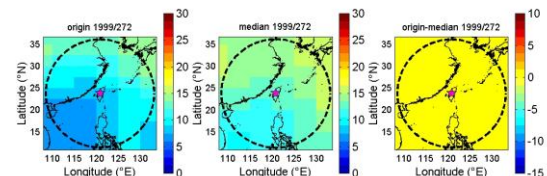
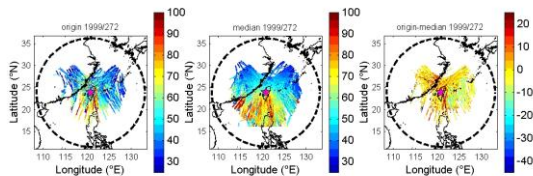
1999/09/25、1999/09/26(UT)



1999/09/27、1999/09/28(UT)



1999/09/29、1999/09/30(UT)



1.以 GPS 分析

- (1)電離濃度前 15 天中位數相比為較高者：共 10 天，約佔 9 月份 33.3%。
- (2)電離濃度大致與前 15 天中位數相同者：共 16 天，約佔 9 月份 53.3%。
- (3)電離濃度與前 15 天中位數相比為較低者：共 4 天，約佔 9 月份 13.3%。
- (4)09/09 台灣附近電離層電子濃度明顯減少。
- (5)09/17、09/18 在震央周圍電離層電子濃度明顯減少。

09/01	09/02	09/03	09/04	09/05	09/06	09/07	09/08	09/09	09/10
09/11	09/12	09/13	09/14	09/15	09/16	09/17	09/18	09/19	09/20
09/21	09/22	09/23	09/24	09/25	09/26	09/27	09/28	09/29	09/30

2.以 GIM 分析

- (1)電離濃度較前 15 天中位數為高者：共 2 天，約佔 9 月份 6.7%。
- (2)電離濃度大致與前 15 天中位數相同者：共 22 天，約佔 9 月份 73.3%。
- (3)電離濃度較前 15 天中位數為低者：共 6 天，約佔 9 月份 20%。

09/01	09/02	09/03	09/04	09/05	09/06	09/07	09/08	09/09	09/10
09/11	09/12	09/13	09/14	09/15	09/16	09/17	09/18	09/19	09/20
09/21	09/22	09/23	09/24	09/25	09/26	09/27	09/28	09/29	09/30

3.比較 GPS 與 GIM

(1)結果大致相同者

09/01、09/03、09/06、09/09、09/13、09/14、09/15、09/16、09/20、09/24、09/25、09/26、09/29、09/30，共 14 天，約佔 46.7%。

(2)結果相異者

09/02、09/04、09/05、09/07、09/08、09/10、09/11、09/12、09/17、09/18、09/19、09/21、09/22、09/23、09/27、09/28，共 16 天，約佔 53.3%。

(3)無相去甚遠者。

(二)以標準差 σ 檢驗其是否為異常

每一張圖包含八張子圖。上左為當天(原始的 TEC 數值)-(前 15 天中位數)，上中左為 $|\Delta\text{TEC}| \geq \sigma$ ，上中右為 $|\Delta\text{TEC}| \geq 2\sigma$ ，上右則為 $|\Delta\text{TEC}| \geq 3\sigma$ 。下四張子圖由左至右分別為下一天(原始的 TEC 數值)-(前 15 天中位數)、 $|\Delta\text{TEC}| \geq \sigma$ 、 $|\Delta\text{TEC}| \geq 2\sigma$ 、 $|\Delta\text{TEC}| \geq 3\sigma$ 。

(紅色星號為震央位置)

GPS

Origin-Median σ

2σ

3σ

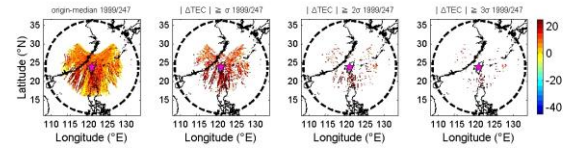
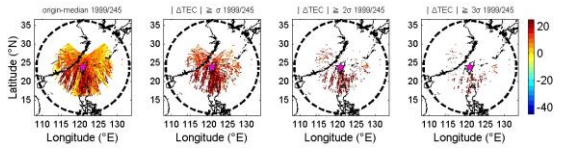
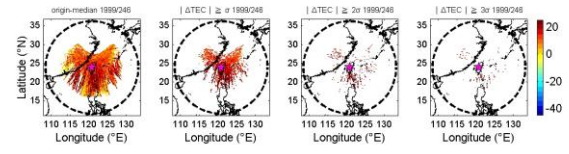
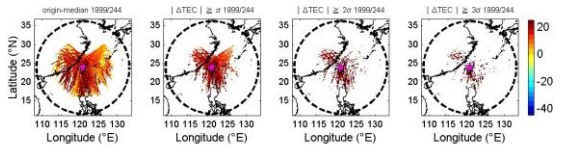
Origin-Median σ

2σ

3σ

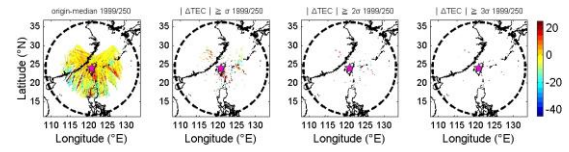
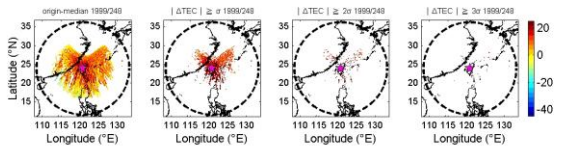
1999/09/01、1999/09/02(UT)

1999/09/03、1999/09/04(UT)



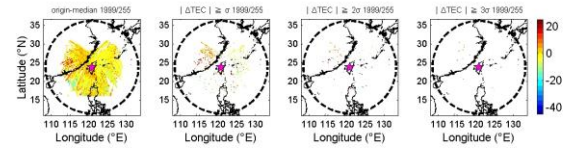
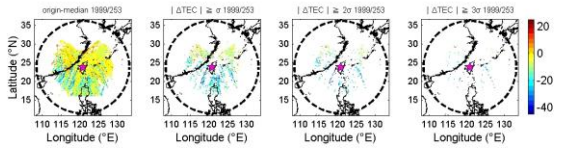
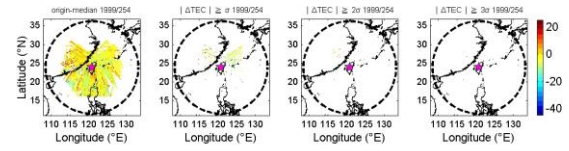
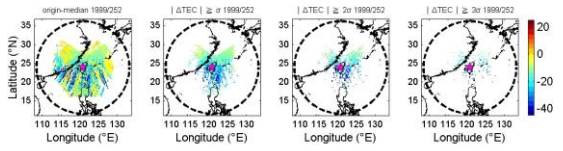
1999/09/05、1999/09/06(UT)

1999/09/07、1999/09/08(UT)



1999/09/09、1999/09/10(UT)

1999/09/11、1999/09/12(UT)



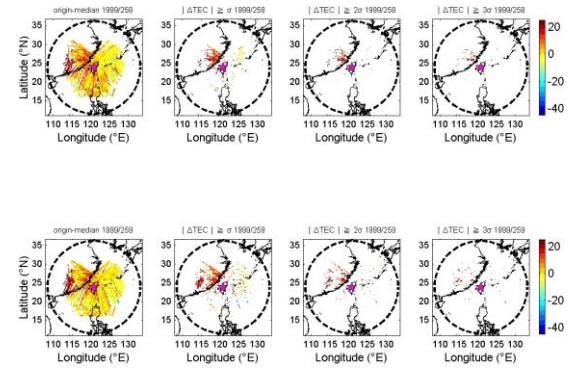
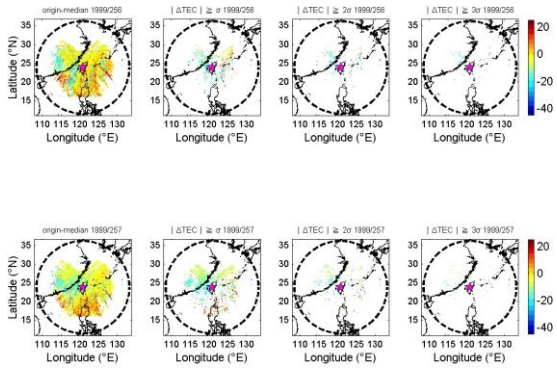
GPS

Origin-Median σ 2σ 3σ

Origin-Median σ 2σ 3σ

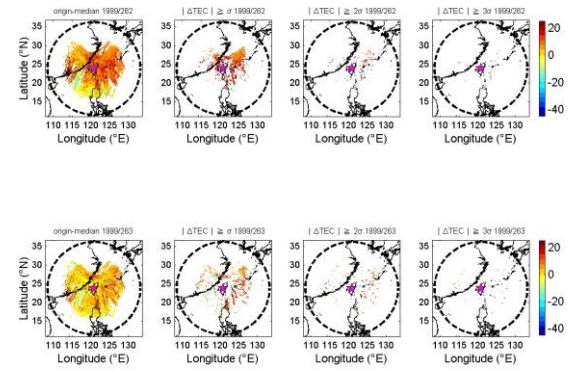
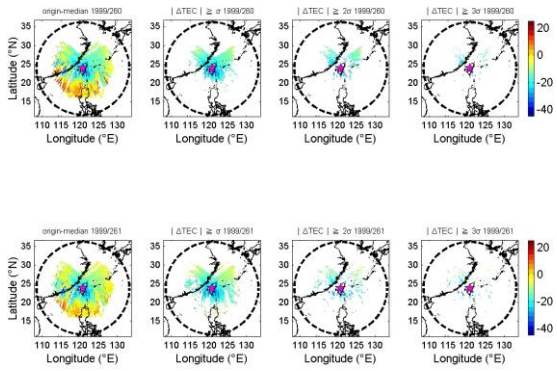
1999/09/13、1999/09/14(UT)

1999/09/15、1999/09/16(UT)



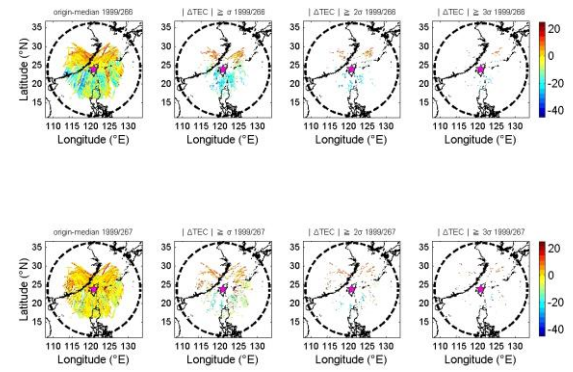
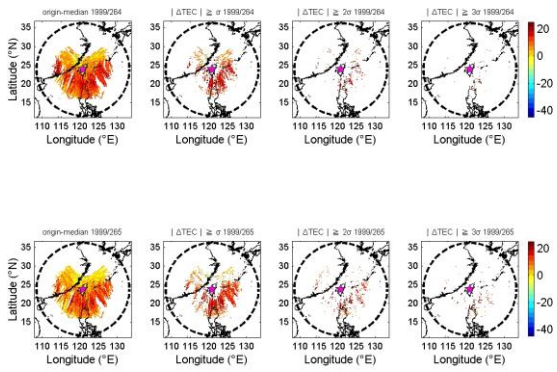
1999/09/17、1999/09/18(UT)

1999/09/19、1999/09/20(UT)



1999/09/21、1999/09/22(UT)

1999/09/23、1999/09/24(UT)

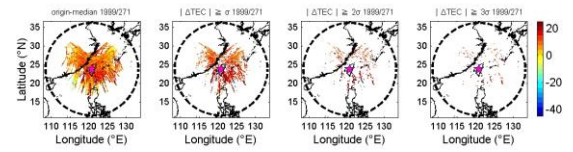
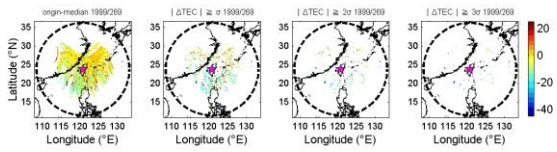
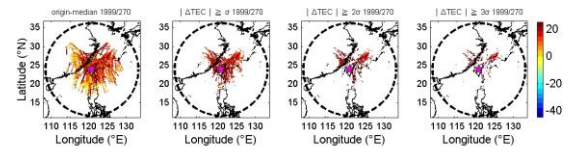
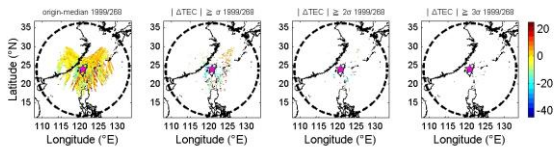


GPS

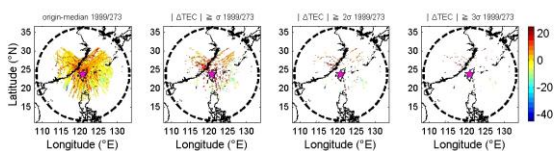
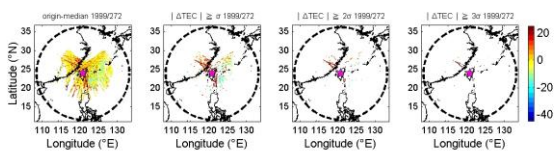
Origin-Median σ 2σ 3σ Origin-Median σ 2σ 3σ

1999/09/25、1999/09/26(UT)

1999/09/27、1999/09/28(UT)



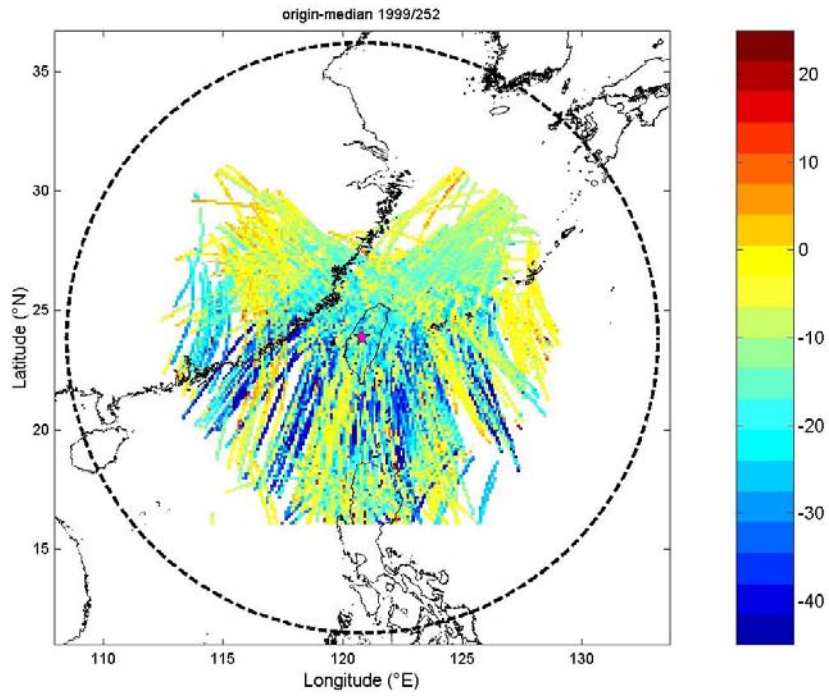
1999/09/29、1999/09/30(UT)



1.以 3σ 檢驗電離濃度異常高者：

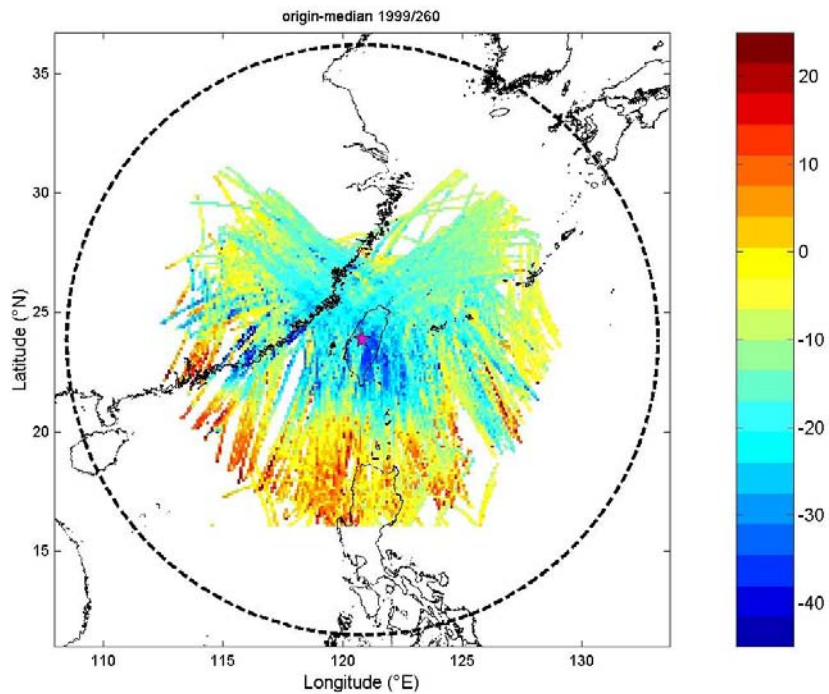
09/01、09/02、09/03、09/04、09/27、09/28，共 6 天，約佔 9 月份 20%。

2.以 3σ 檢驗電離濃度異常低者：09/09、09/17、09/18，共 3 天，約佔 9 月份 10%。



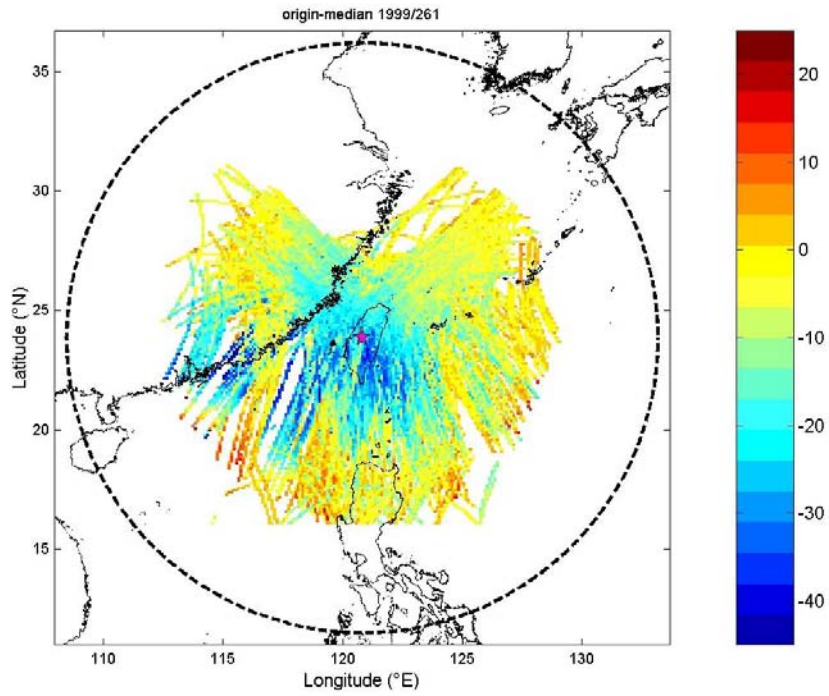
1999/09/09

以 3σ 檢驗，電子濃度仍異常低者。濃度減少最多者大致分布在台灣東側、西側及南側。(紅色星號為震央位置)



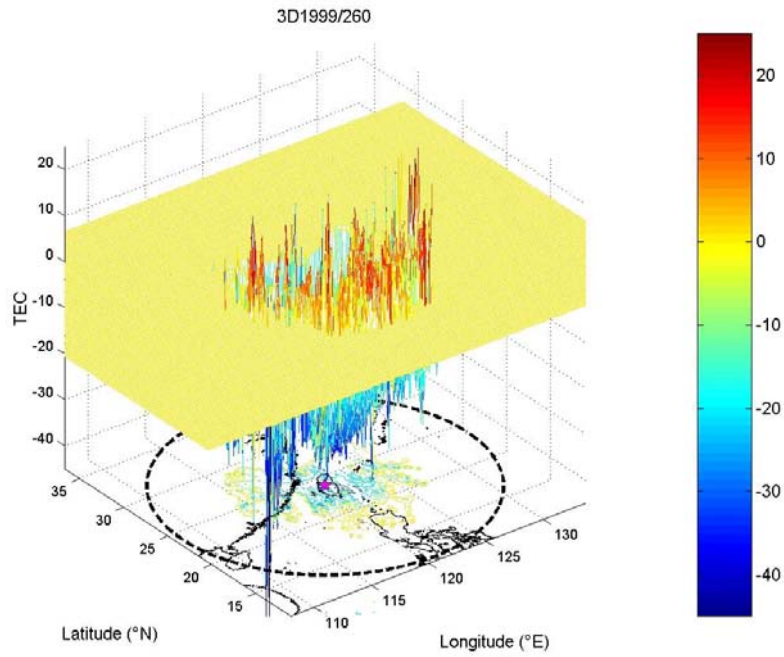
1999/09/17

以 3σ 檢驗，電子濃度仍異常低者。濃度減少最多者大致在震央東南側及台灣西側，且震央附近電子濃度皆有減少的現象。(紅色星號為震央位置)



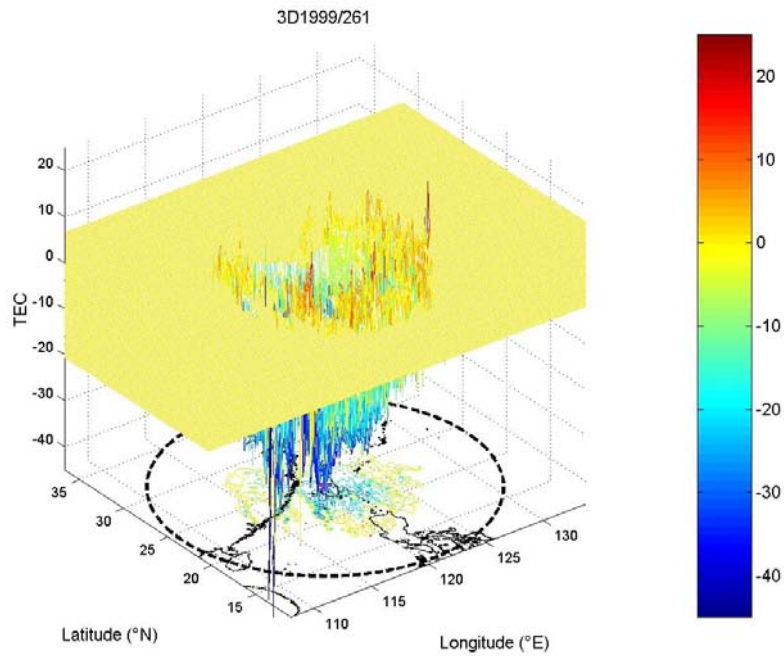
1999/09/18

以 3σ 檢驗，電子濃度仍異常低者。濃度減少最多者大致在震央東南側及台灣西南側，且震央附近電子濃度皆有減少的現象。(紅色星號為震央位置)



1999/09/17

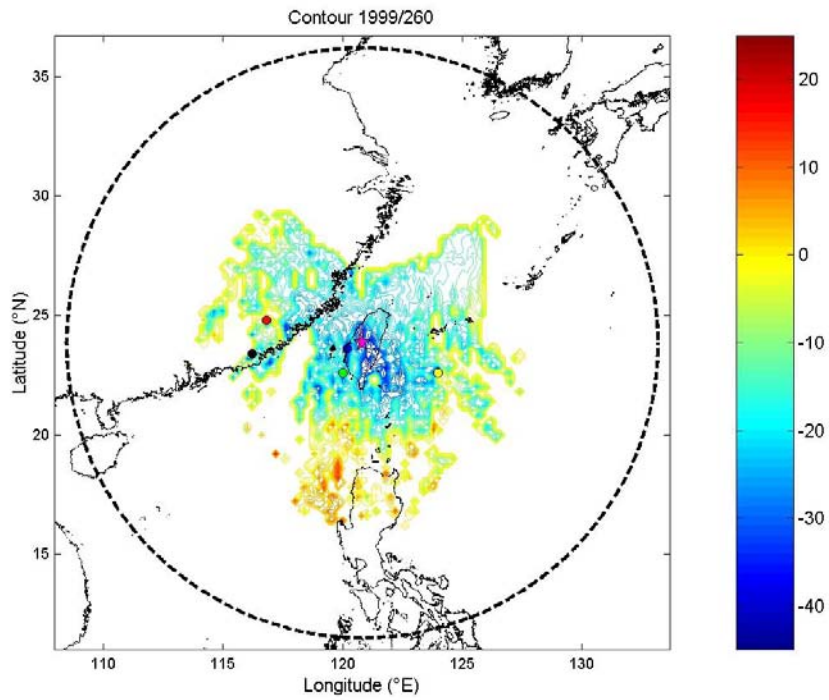
以 3D 圖檢視台灣地區及其附近上空電離層電子濃度減少情形，並在 xy 平面上投影出等值線圖。藍綠色為濃度較前 15 天 TEC 中位數為低者，反之則為橘紅色。(紅色星號為震央位置)



1999/09/18

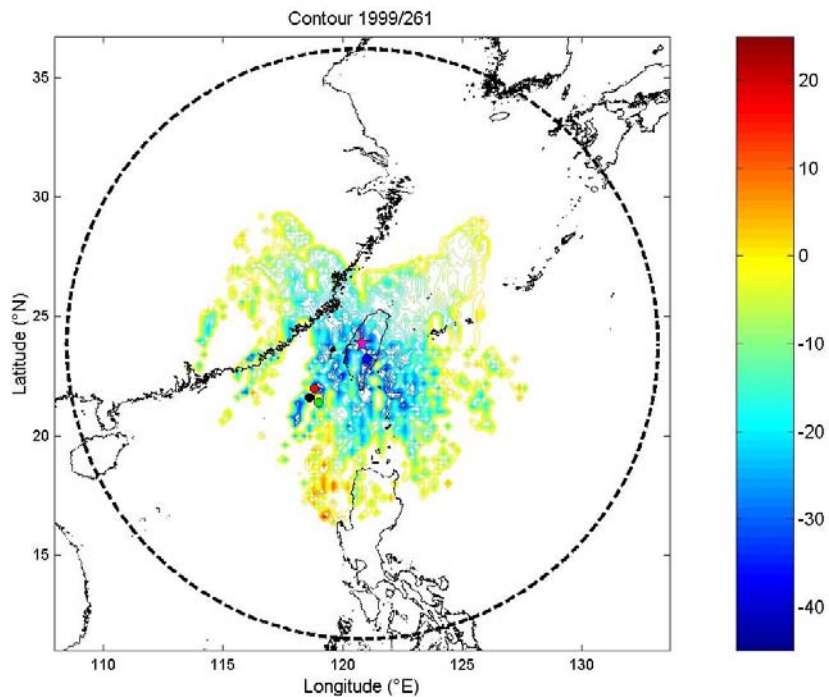
以 3D 圖檢視台灣地區及其附近上空電離層電子濃度減少情形，並在 xy 平面上投影出等值線圖。藍綠色為濃度較前 15 天 TEC 中位數為低者，反之則為橘紅色。(紅色星號為震央位置)

(三)下降幅度較多的點



1999/09/17

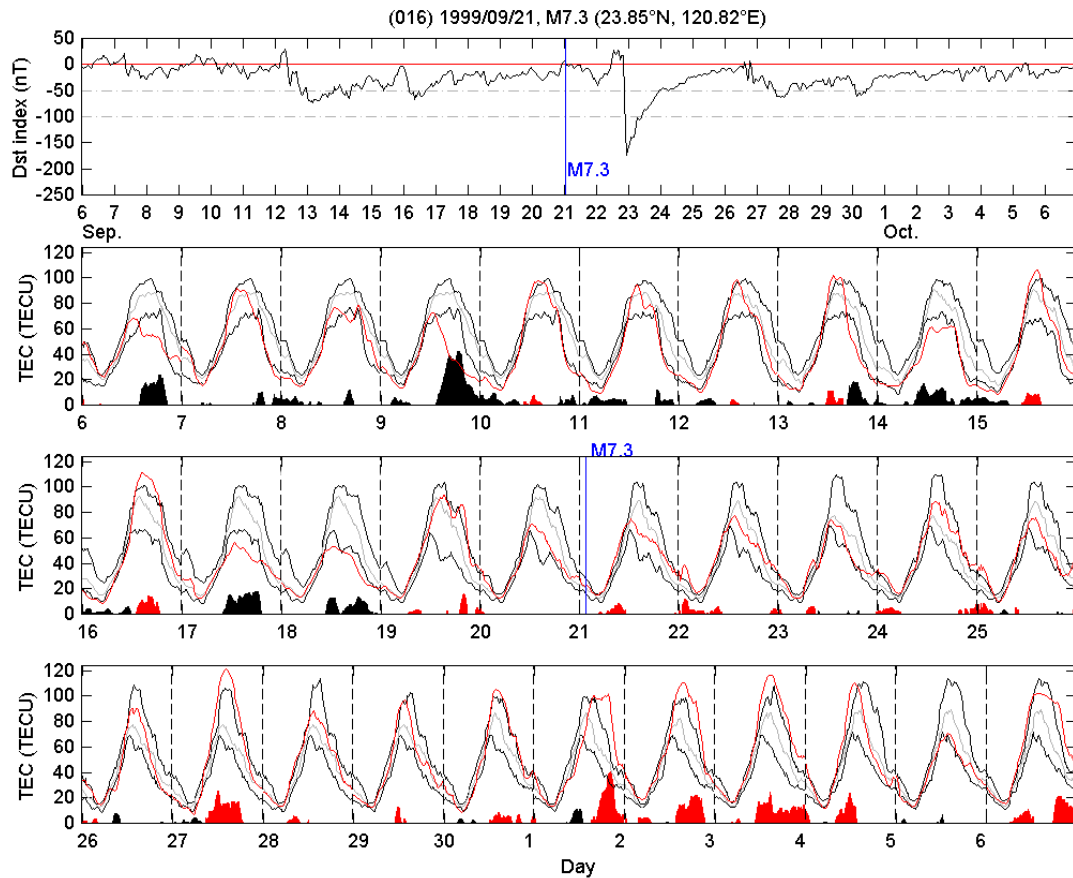
下降幅度較大的前 5 名，依次以紅、黃、綠、藍、黑點標示。下降最多的點(紅)約位於震央西北西方之中國東南地區。其中最接近震央的點則為位於震央西南方下降第四多(藍)的點。(紅色星號為震央位置)



1999/09/18

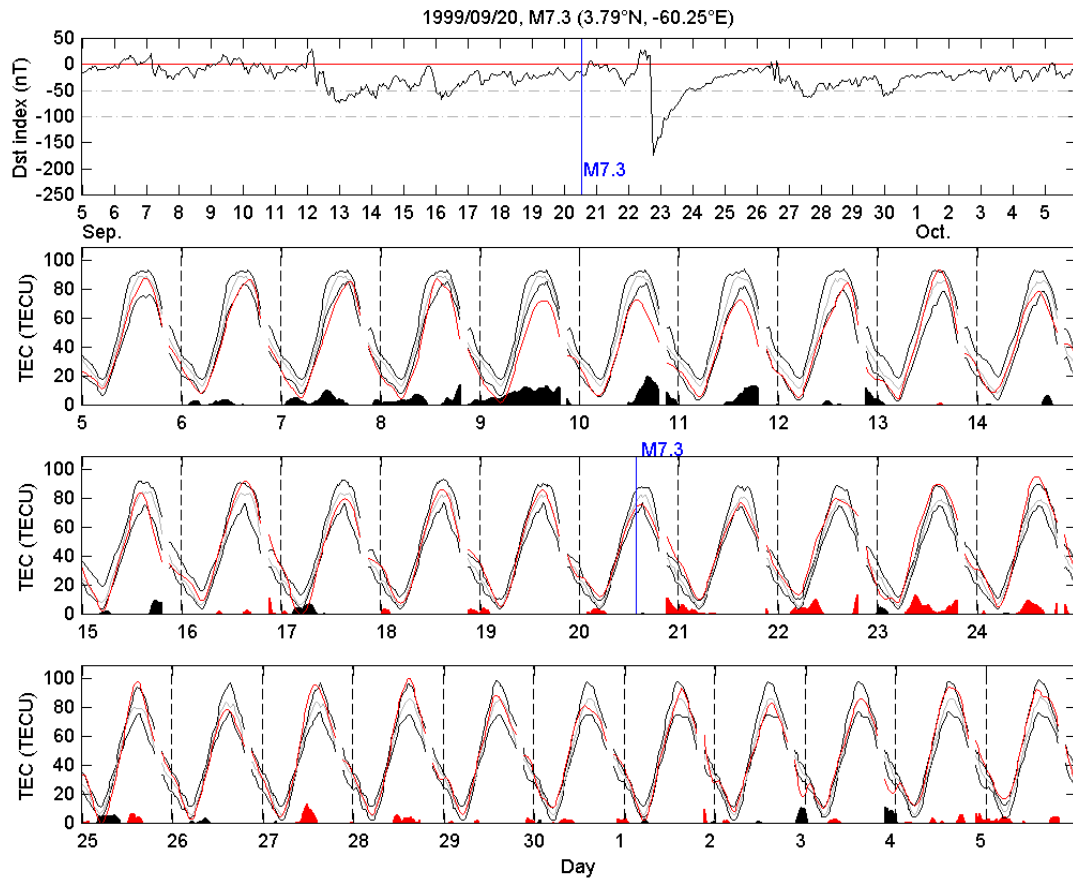
下降幅度較大的前 5 名，依次以紅、黃、綠、藍、黑點標示。下降最多(紅)、次多(黃)、三多(綠)、五多(黑)的點約集中位於震央西南方之海面上。其中最接近震央的點則為位於震央東南方下降第四多(藍)的點。(紅色星號為震央位置)

(四)相同磁緯、相同地方時間之比較



震央(23.85°N, 120.82°E)上空 9 月份電離層電子濃度變化圖(劉正彥, 2002)。

第一列為太陽的活動，在 9/23 前後有一大磁暴。第二、三、四列為電離層電子濃度變化，紅線為當天原始數據，灰線為前 15 天 TEC 中位數，兩黑線則分別為上界異常值及下界異常值。由圖中可以看出 9/17、9/18 此地(震央)上空的電離層電子濃度明顯低於下界異常。



本研究參考上圖方式繪製與集集大地震震央相同磁緯、磁經相差 180° 之點(3.79°N , -60.25°E)，所得該地上空 9 月份電離層電子濃度變化圖。

第一列為太陽的活動，在看出 9/23 前後有一大磁暴。第二、三、四列為電離層電子濃度變化，紅線為當天原始數據，灰線為前 15 天 TEC 中位數，兩黑線則分別為上界異常值及下界異常值。由圖中可以看出 9/17、9/18 此地點上空並沒有高於上界異常值，亦無低於下界異常值。

(五) 太陽活動以 F10.7 相近的日期作比較

1. 選出與 1999 年 921 集集地震相近 F10.7 數值的 2003 年 1 月，分析該月的電離層電子濃度

左圖包含六張子圖。上左為當天原始的 TEC 數值，上中為前 15 天 TEC 中位數，上右則為(原始的 TEC 數值) - (前 15 天 TEC 中位數)。下三張子圖由左至右分別為下一天原始的 TEC 數值、前 15 天 TEC 中位數、(原始的 TEC 數值) - (前 15 天 TEC 中位數)。

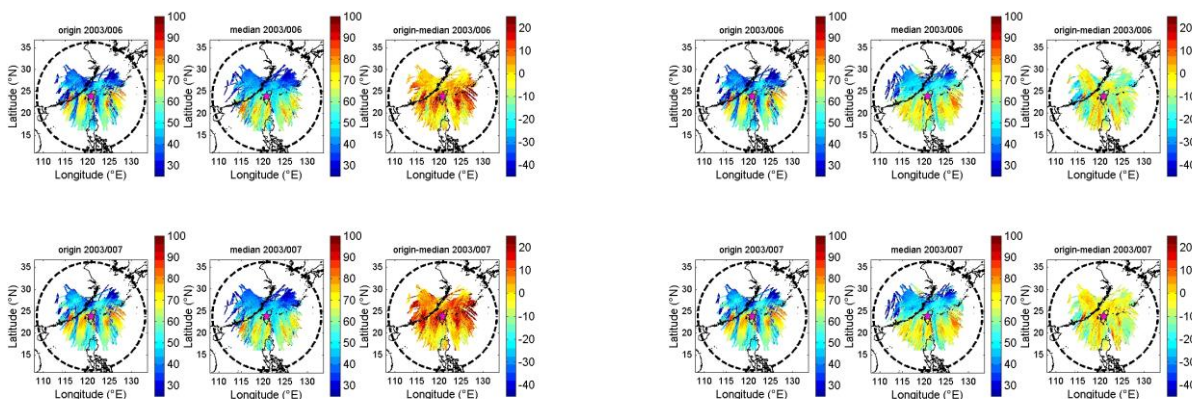
右圖包含六張子圖。上左為當天原始的 TEC 數值，上中為後 15 天 TEC 中位數，上右則為(原始的 TEC 數值) - (後 15 天 TEC 中位數)。下三張子圖由左至右分別為下一天原始的 TEC 數值、後 15 天 TEC 中位數、(原始的 TEC 數值) - (後 15 天 TEC 中位數)。

	GPS			GIM		
Origin	Median	Origin-Median	Origin	Median	Origin-Median	
原始數據	中位數	原始-中位數	原始數據	中位數	原始-中位數	

前 15 天中位數

後 15 天中位數

2003/01/06、2003/01/07(UT)



- (1)左圖顯示電離濃度較前 15 天中位數為高
- (2)右圖顯示電離濃度較後 15 天中位數為低

2.以 σ 檢驗其是否異常

左圖包含八張子圖。上左為當天(原始的 TEC 數值)-(前 15 天中位數)，上中左為 $|\Delta\text{TEC}| \geq \sigma$ ，上中右為 $|\Delta\text{TEC}| \geq 2\sigma$ ，上右則為 $|\Delta\text{TEC}| \geq 3\sigma$ 。下四張子圖由左至右分別為下一天(原始的 TEC 數值)-(前 15 天中位數)、 $|\Delta\text{TEC}| \geq \sigma$ 、 $|\Delta\text{TEC}| \geq 2\sigma$ 、 $|\Delta\text{TEC}| \geq 3\sigma$ 。

右圖包含六張子圖。上左為當天(原始的 TEC 數值)-(後 15 天中位數)，上中左為 $|\Delta\text{TEC}| \geq \sigma$ ，上中右為 $|\Delta\text{TEC}| \geq 2\sigma$ ，上右則為 $|\Delta\text{TEC}| \geq 3\sigma$ 。下四張子圖由左至右分別為下一天(原始的 TEC 數值)-(前 15 天中位數)、 $|\Delta\text{TEC}| \geq \sigma$ 、 $|\Delta\text{TEC}| \geq 2\sigma$ 、 $|\Delta\text{TEC}| \geq 3\sigma$ 。

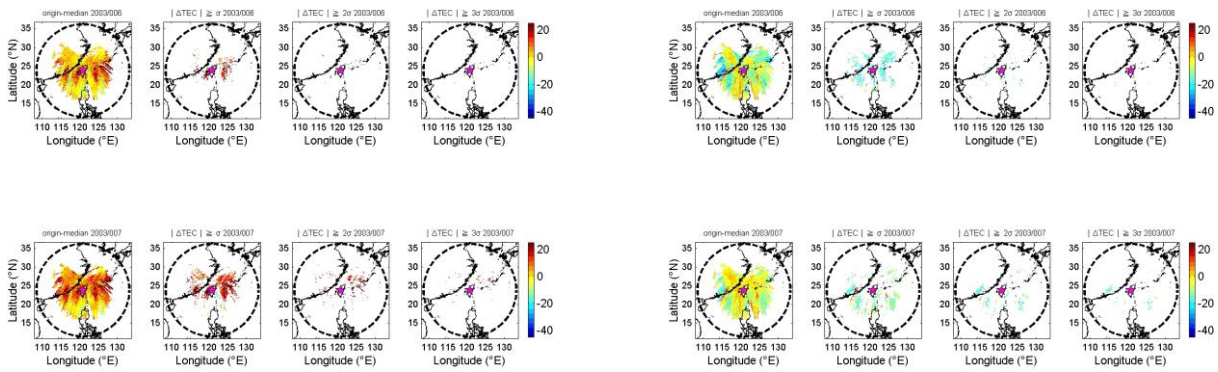
GPS

Origin-Median σ 2σ 3σ Origin-Median σ 2σ 3σ

前 15 天中位數

後 15 天中位數

2003/01/06、2003/01/07(UT)



(1)以 3σ 檢驗，兩者皆無異常。

陸、討論

一、1999 年 921 集集地震前夕，台灣上空電離層電子濃度異常減少的可能因素

以 GPS 換算所得電離層全電子含量(TEC)數值，在震央周圍之電子濃度明顯減少的日期為 1999/09/09、09/17 與 09/18。進一步以標準差檢驗其是否為異常，結果仍有許多點的數值大於 3 個標準差(0.3%的機率)，因此實屬為異常現象。

前人研究指出台灣地區 184 個規模 ≥ 5.0 之地震統計顯示，電離層電子濃度減少通常發生於地震前 1-5 天(Liu, J. Y., C. H. Chen, Y. I. Chen, H. Y. Yen, K. Hattori, and K. Yumoto, 2006)。1999/09/09 電子濃度的減少，可能與集集大地震無關，但當時並無太陽強烈活動或磁暴發生，根據中央氣象局地震紀錄，得知 1999/09/10 14:18(UT)有一芮氏規模 5.4 的地震，其震央為 (22.44°N, 121.83°E)，推測可能與此次電子濃度減少有關。

二、9/17-9/18 電離層電子濃度異常是否受太陽活動影響

1999/09/17 與 09/18，震央周圍之電子濃度明顯減少，但太陽活動與前幾天無太大差別。電子濃度與太陽活動息息相關，在一天之中就可以明顯的看出其隨太陽而移動的現象。為排除此因素的影響，選取相同磁緯、Local Time 作一比較。由於 1999 年 GPS 測站尚未十分發達，此次僅以一點(3.79°N, -60.25°E)與震央上空比較。此點並無出現異常現象，可排除此因素之影響。

為確認其電離濃度減少現象並非由太陽活動所引起，另以太陽活動相似時檢驗。太陽的活動周期為 11 年，若假設其活動為一波形，2010 年為 1999 年後一周期，但尚未來臨，無法作對照。又電離層相關資料數據是在 1995 年之後漸漸發展，因此前 11 年 1988 年也無法作為對照，所以選了 F10.7 數值相近的 2003 年作一比較。作為檢驗電離濃度是

否增加或減少的標準，若取的資料時間較短(例如 <7 天)沒有統計上的可信度，較長(例如 >30 天)又會受到電離濃度季節性不同的影響。在台灣規模 ≥ 5.0 的地震之重覆發生(the reoccurrence day)為 12-14 天，為避免餘震效應，以前 15 天中位數作為標準。2001 年為太陽極大期，若以較巨觀的角度，1999 太陽活動正在上升，2003 年則在下降，為作為 1999 年的對照組，考慮作為標準的中位數應取前 15 天或後 15 天。將此兩者皆以標準差檢驗，均無異常。進一步比較 F10.7 數值，1999/09/17、09/18 前 15 天中位數皆為 1335，2003/01/06、01/07 前 15 天中位數皆為 1232，後 15 天中位數則分別為 1578、1450，得知前 15 天中位數較接近 1999 年。

柒、結論

1999/09/17、09/18 電離層電子濃度的減少經 GPS 全電子含量(TEC)檢驗，以前 15 天 TEC 中位數當作背景參考值，探討電子濃度的增加或減少，且以標準差 3σ 檢驗確認其為一異常現象。再進一步檢驗相同磁緯、Local Time 及太陽黑子數相近的 2003 年 01/06、01/07 均無相似現象發生，因此判斷當時震央周圍電離層電子濃度明顯減少的異常現象，極可能與 921 集集大地震有關聯。

本研究亦比較 GPS 反衍所得電離層電子濃度與 GIM 的差異，GIM 在時間及空間解析度不如 GPS 觀測資料來得好，係因其資料空白處常應用模式關係補白，且台灣地區面積較小等因素，檢驗結果顯示效果不如 GPS。

捌、未來展望

希望能更深入分析電子濃度減少之趨勢與地震震央及斷層位置的相關性。

分析規模 ≥ 6.0 台灣地區地震與電離層電子濃度的相關性，並希望能將分析範圍擴大至同樣位於環太平洋火山地震帶的日本地區。

玖、參考資料及其他

- 一、Chen, Y. I., J. Y. Liu, Yi-Ben Tsai, and Chuan-Shu Chen, 2004
Statistical Tests for Pre-earthquake Ionospheric Anomaly, *Terr. Atmo. Oce. Sci.*, **15**, 385-396.
- 二、Dobrovolsky, I. P., S. I. Zubkov, V. I. Miachkin, 1979
Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure and Appl. Geophys.*, **117**, 1025-1044.
- 三、Liu, J. Y., Y. I. Chen, Y. J. Chuo, 2006
A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly, *Journal of Geophysical, Res.*, **111**, A05304, 10.1029/2005JA011333. (SCI)
- 四、Liu, J. Y., Ho Fang Tsai and Ting Kuo Jung, 1996
Total Electron Content Obtained by Using the Global Positioning System, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences.*, **7**, 107-117.
- 五、Liu, J. Y., C. H. Chen, Y. I. Chen, H. Y. Yen, K. Hattori, and K. Yumoto, 2006

Seismo-geomagnetic anomalies and M 5.0 earthquakes observed in Taiwan during 1988-2001,
Phys. Chem. Earth, **31**, 215-222.

六、Global Ionospheric Map http://www.ips.gov.au/HF_Systems/6/5

七、劉正彥教授(2002)，高空電離層透露的訊息，《科學發展》，305 期，20-24 頁

八、陳佳宏(2006)，電離層赤道異常與赤道電噴流，國立中央大學太空科學研究所碩士論文

九、美國地質調查局(United States Geological Survey, USGS) <http://www.usgs.gov/>

十、中央氣象局 <http://www.cwb.gov.tw/>

十一、維基百科 <http://www.wikipedia.org/>

十二、美國國家航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)
<http://www.nasa.gov/>

十三、World Data Center for Geomagnetism, Kyoto
<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

【評語】 040506

本作品分析 921 大地震之前一週所觀察到的電離層異常現象，排除太陽活動的影響，得到極可能自地震的結論，本研究主題明確，分析方法確實，雖然展示現場未列出參考資料來源，但書面資料完整。研究者敘述清楚，具有科學思考態度，值得鼓勵。