

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 地球科學科

040510

回波反兆—由調頻連續波回波頻率圖找尋地震
震前兆與電離層間的關係

學校名稱：國立新竹高級中學

作者： 高二 吳東鴻	指導老師： 黃晟庭
---------------	--------------

關鍵詞：電離層、地震前預兆、調頻連續波回波

摘要

以 2007~2015 年規模大於 5.5 的地震，配合國家通訊傳播委員會電離層觀測站的電離層圖與頻率特性圖找出電子濃度異常時段，觀察地震規模、地震深度與震前 10 日之間的關係，並觀察造成電子濃度異常的震前天數、震源跟測站間距離、地震的規模與地震深度的相互關聯。

影響到電離層的旺盛期位於震前 3~5 天，震前一天為寧靜期，與規模大小無明顯關係。

台灣東部太平洋海域小規模地震較不易影響到電離層，推測地震規模小釋放出的電子也少，可能被海水吸收。地震前兆電子釋放所在位置的岩質剛性越大，較容易影響到電離層。

震源離測站距離越遠，若要能影響電離層 E 層，則地震的規模就需要越大。地震前兆影響電離層 E 層範圍半徑 R 與地震規模 M 的關係模型為：

$$R = 10^{0.65M}$$

壹、研究動機

日本時間 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分發生於日本東北地方外海三陸的震矩規模 9.0 大型逆衝區地震。此次地震不僅是日本有觀測紀錄以來規模最大的地震，引起的海嘯也是最為嚴重的，加上其引發的火災和核能洩漏事故，導致全國性的地方機能癱瘓和經濟活動停止，東北地方部份城市更遭到毀滅性破壞，像這種大規模的地震在出現前難道都沒有任何預兆？而同樣位於環太平洋地震帶的我們是否也就只能等到地震發生了才被動的接受它們帶來的災害？翻開基礎地科課本仍是沒有確切的預測辦法。偶然看到一篇地震與電離層之間關係的報導，其中的內容吸引我想研究看看電離層濃度的變化與地震之間是否有特殊的關聯。

貳、研究目的

- 一、了解台灣地區規模較大的地震(≥ 5.5)對電離層 E 層電子濃度的影響與關係。
- 二、由電離層反射回波頻率，觀察地震前電離層濃度是否會出現異常。

參、研究設備及器材

- 一、中央氣象局地震活動彙整資料，2007-2015 年
- 二、國家通訊傳播委員會電離層觀測站資料（從桃園中壢站發射高頻訊號，並由桃園崙坪站接收回波訊號），2007-2015 年
- 三、Microsoft Excel、Word 軟體

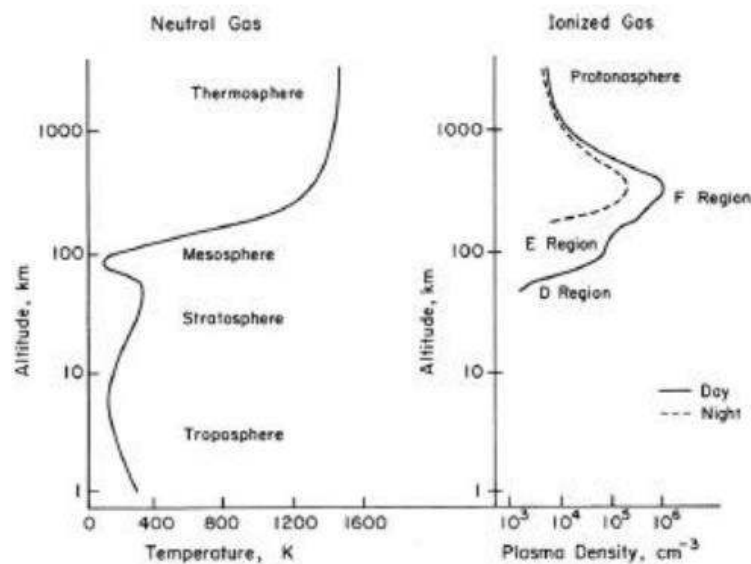
肆、研究過程或方法

- 一、文獻探討

（一）電離層的分層

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，而且會影響電波傳播，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，亦可經由電子與離子的結合而消失，或經傳輸作用而改變。一般分為 D、E、F 三層。

1. D 層：為電離層的最低層，高度範圍大約從 70 公里到 90 公里，且在白天時的電子濃度也很低，約為 $2.5 \times 10^9 \text{el/m}^3$ 。
2. E 層：高度約為 90 公里到 160 公里高，在正常情況下，夜晚時因無太陽光之光化學反應，所以電子濃度難以探測，而白天時之電子濃度約為 $1 \times 10^{11} \text{el/m}^3$ 。
3. F 層：是電離層最高的一層，也因傳輸作用而帶有最多的電漿濃度約為 $1 \times 10^{12} \text{el/m}^3$ ，白天時分為 F1(位置較低)及 F2(位置較高)層，到了夜晚時則合併成一層。



圖一，中性大氣各層與電離層各層對照示意。其中左圖為中性大氣；右圖為電離層，實線代表白天，虛線代表夜晚。(Kelly,1989)

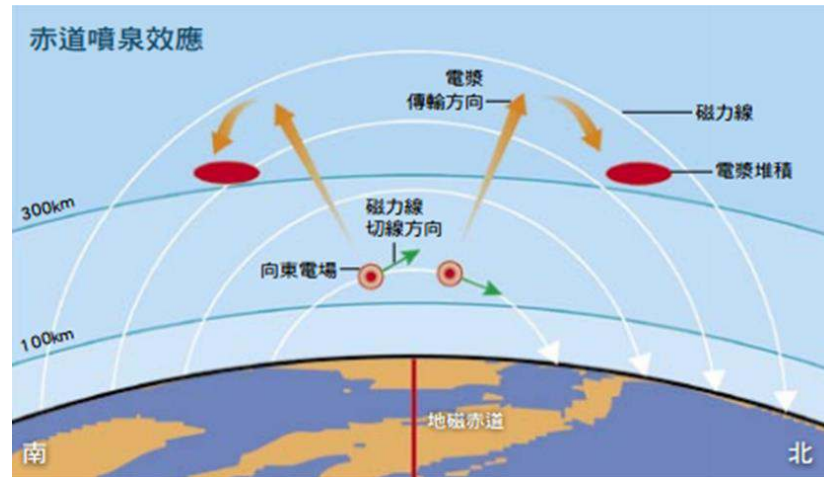
(二) 電離層之異常現象

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，夏季時此地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。

2. 赤道異常

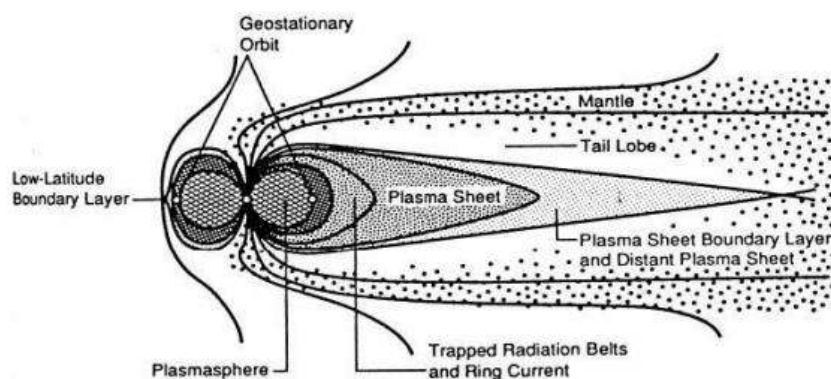
電離層 F 層在地磁赤道地區存在有明顯電漿濃度減少的現象，而於磁赤道兩側約 20°附近卻形成兩個電漿濃度峰值。而此現象的成因主要是因白天赤道上空 F 層處的東向電場造成向上的 $\vec{E} \times \vec{B}$ 漂移，隨後受重力影響，使之沿著磁力線向下擴散所造成的。



圖二，赤道異常示意圖。(摘自科學人 2008 年 10 月號 140 頁)

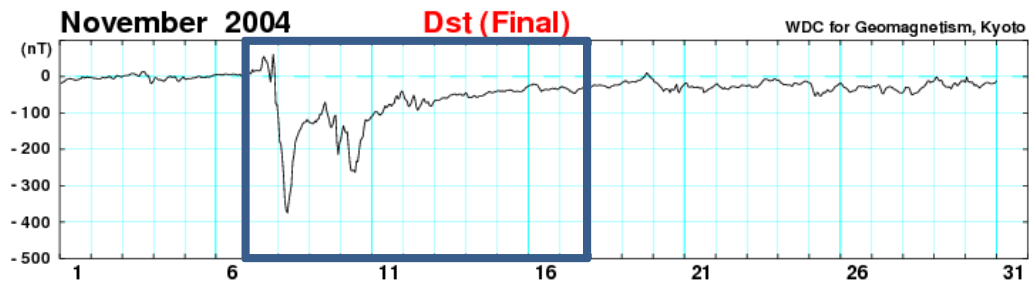
(三) 磁暴

因太陽風會與地球磁場相互作用而形成磁層，在磁層裡，帶電粒子受到地球磁場的控制，地球夜側因受到太陽風拖曳作用，使得磁層頂位置比日側遠，這些帶電離子也因此能被帶到離地球數百至數千個地球半徑的地方。但當太陽風的速度及密度突然改變時，伴隨的能量將會耦合進入磁層、電離層乃至高層大氣，進而造成地球磁場劇烈擾動而形成磁暴，其磁場劇烈變化稱為擾動日。跟隨磁暴發生後之數小時至數天，電離層電漿密度亦會產生強烈變化形成電離層暴。



圖三，地球磁層內部結構。(Davies,1990)

地磁指數 The Disturbed Storm Time index (Dst)是藉由採設於赤道上三個地磁站水平磁場分量之觀測值，用來表示地表磁場受擾動程度。一般而言，地磁指數是負數表示磁暴異常，而地磁指數的絕對值越大，表示異常越顯著；當地磁指數小於 -100nT 時，代表強烈磁擾動。



圖四，2004年11月地磁指數，7日到17日深藍色框的範圍代表異常值，單位為nT， $1\text{nT}=10^{-9}$ 特斯拉 (tesla)。(摘自 WDC for Geomagnetism, Kyoto)

(四) 地震前會使電離層濃度改變的可能原因有三項：

1. 地殼化學理論

地殼中的鐳等放射性物質在衰變的過程中，氦是其中的一項中間產物。而地震發生前，岩石會產生微裂隙，釋放出氦氣。因為氦具有高度的放射性，所以當其衰變時伴隨之能量若進入較高層的大氣，可能使大氣中的氧、氮等分子游離，造成大氣電離層之電子濃度改變。

2. 地電磁場理論

地震發生前，因岩石變形使分子間共價鍵受到影響而斷裂，價電子脫離共價鍵並成為自由電子，電子離開後會在價電帶上留下一帶有正電荷性質的空缺，繼而感應電離層產生電場。此電場受地磁作用，沿著地球磁場來到更高層的電離層，與地球磁場感應產生電磁力，電漿受此力作用而移動位置，造成電離層電子濃度改變。

3. 重力波理論

地震發生前，地表或大氣產生增溫，溫度升高的大氣因體積膨脹變化，產生高空的大氣波動。此波動引起電場的改變而產生電流，電流和磁場感應產生電磁力，電漿受此力作用移動位置，而造成電離層電子濃

度改變。

(五) 地震規模影響電離層 F 層的範圍

由統計得知地震規模與可影響到電離層 F 層的範圍有關 (Shiokawa,1999)。出現地震前兆影響電離層 F 層範圍半徑 R 與地震規模 M 的關係如下：

$$R = 10^{0.43M}$$

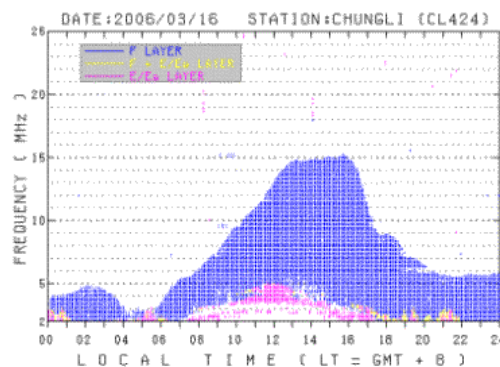
R 單位為公里 (km)。M 為芮氏規模。

(六) 散塊 E 層

是電子濃度高於其背景 E 層的一個層狀結構，常出現在高度 90~120 km 之間，不同的緯度也可看到，且濃度可以高於背景濃度一個數量級。散塊 E 層是由金屬正離子聚集而成，如 Fe^+ 、 Mg^+ 等。這些金屬離子是由流星經燒蝕蒸發後產生的金屬粒子，經由光離化過程離化成金屬離子。散塊 E 層在高度上分布很窄(約為 0.6~2 km)，且常以緩慢的速度($0.6\sim 4\text{ ms}^{-1}$)下降。在同一時間可以有許多散塊 E 層發生，且高度上相隔 6~10 km。散塊 E 層可以在水平方向上、平坦均勻地分布，而有些時候也會如雲一樣地在水平方向上以每秒 20~130 公尺的速度移動。通常出現機率以在夏季較高，並以白天 (0600-1700 LT 左右) 居多。另外，夜晚的散塊 E 層也以在夏季較高，冬季則明顯較少。

(七) 國家通訊傳播委員會電離層觀測站之頻率特性圖

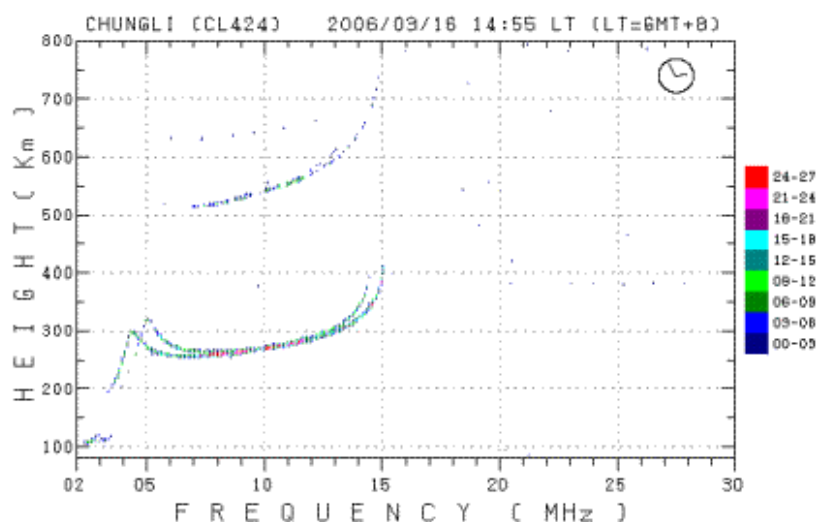
顯示電離層圖中回波頻率範圍隨時間的變化特性。可細分為 F 層及 E 層特性圖，橫軸為時間(自 00 時自 24 時止)，縱軸為頻率(單位為 MHz)。



圖五，頻率特性圖。(摘自國家通訊傳播委員會電離層觀測站)

(八) 國家通訊傳播委員會電離層觀測站之電離層圖

橫軸為頻率(單位為 MHz)，縱軸為高度(單位為 km)並且每 5 分鐘一張電離層圖，全天共有 288 張電離層圖，此圖是以不同的顏色來顯示每個像素所對應之回波強度（越偏藍色表示反射信號越弱，越偏紅色表示反射信號越強）。



圖六，電離層圖。(摘自國家通訊傳播委員會電離層觀測站)

二、研究分析

(一) 「利用全球定位系統觀測電離層地震前兆」(林鈺祥，2004)的結論得知，規模大於 5.5 的地震震前電離層濃度異常天出現於地震發生前 10 日內居多，所以選取範圍是地震震前 10 日的資料。再將規模分為大於等於 6.0 及 5.5~5.9 兩部分，分別計數出總共異常次數後，並以一天為間格做統計總加，再進行比例上的判斷。

三、將正常日的回波訊號視為對照組，並確認是否也有此異常現象。本研究將正常日的定義為前後一日均無地震，且前後 5 日均無規模大於 5.5 的地震(圖七)，且當日無磁暴現象(圖八)。例如：2014 年 11 月 28 日為正常日，可見電離層 E 層(紅色部分)的電子濃度並沒有超過 F 層(藍色部分)，且濃度相當平穩。於日間出現，夜間則觀測不到，主要是因為電離層 E 層是太陽光離化作用產生的，無太陽光時便會慢慢消失(圖九)。

地震編號	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
小區域	11月22日20時57分	121.01	23.98	9.8	3.3	南投縣政府東偏北方 33.5 公里 (位於南投縣埔里鎮)
小區域	11月23日08時48分	121.43	23.84	18.7	2.9	花蓮縣政府西南方 25.4 公里 (位於花蓮縣秀林鄉)
小區域	11月23日13時11分	121.88	24.48	11.0	3.3	宜蘭縣政府南偏東方 30.4 公里 (位於宜蘭縣近海)
小區域	11月24日05時38分	120.90	23.00	5.1	3.7	臺東縣政府西北方 37.4 公里 (位於臺東縣海端鄉)
小區域	11月25日00時35分	121.37	23.65	16.0	3.4	花蓮縣政府西南方 45.8 公里 (位於花蓮縣萬榮鄉)
小區域	11月25日10時23分	120.87	22.74	7.9	3.1	臺東縣政府西方 29.0 公里 (位於屏東縣霧台鄉)
小區域	11月25日11時37分	120.90	23.00	5.7	3.4	臺東縣政府西北方 37.1 公里 (位於臺東縣海端鄉)
小區域	11月25日16時27分	121.63	23.48	46.8	4.1	花蓮縣政府南方 56.3 公里 (位於臺灣東部海域)
小區域	11月26日04時06分	121.96	23.96	36.8	3.8	花蓮縣政府東方 34.9 公里 (位於臺灣東部海域)
小區域	11月26日07時14分	121.79	24.27	11.9	3.3	花蓮縣政府北偏東方 35.4 公里 (位於花蓮縣近海)
小區域	11月30日07時30分	121.72	24.30	50.3	3.9	花蓮縣政府北偏東方 35.6 公里 (位於花蓮縣秀林鄉)
小區域	11月30日08時00分	121.39	23.75	17.4	2.9	花蓮縣政府西南方 35.4 公里 (位於花蓮縣萬榮鄉)
第143號	11月30日18時53分	121.83	24.37	17.0	3.8	宜蘭縣政府南方 40.5 公里 (位於宜蘭縣近海)
第144號	11月30日19時34分	121.83	24.37	17.0	3.2	宜蘭縣政府南方 40.3 公里 (位於宜蘭縣近海)
小區域	12月01日01時21分	121.40	23.75	18.6	3.1	花蓮縣政府西南方 34.7 公里 (位於花蓮縣萬榮鄉)
第145號	12月02日18時30分	121.74	24.67	70.2	4.1	宜蘭縣政府南偏西方 7.3 公里 (位於宜蘭縣冬山鄉)
小區域	12月02日19時44分	121.84	24.38	16.5	2.8	宜蘭縣政府南偏東方 39.8 公里 (位於宜蘭縣近海)
小區域	12月03日06時01分	122.13	23.75	28.3	4.9	花蓮縣政府東偏南方 58.0 公里 (位於臺灣東部海域)
小區域	12月04日09時14分	122.16	24.32	56.0	4.5	宜蘭縣政府東南方 60.9 公里 (位於臺灣東部海域)

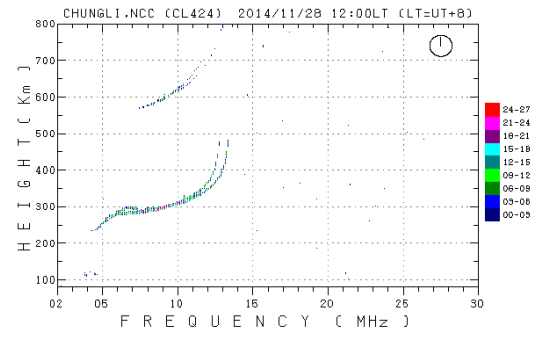
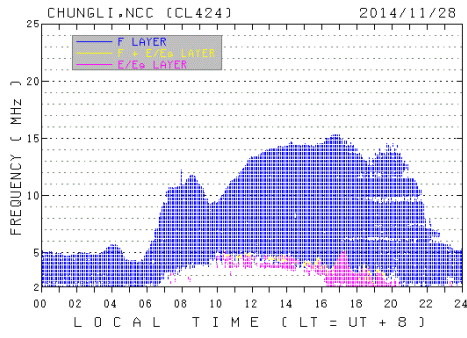
圖七，中央氣象局地震資料彙整圖。

紅色框為 2014 年 11 月 23 日到 2014 年 12 月 3 日之地震擷取資料。可看出 2014 年 11 月 28 日前後一日均無地震，且前後 5 日均無規模大於 5.5 之地震，故視為正常日。



圖八，磁暴資料。

圖中紅色框為 2014 年 11 月 28 日的地磁指數，可看出無異常現象。



圖九，2014年11月28日（平常日）左圖為回波訊號之電離層頻率特性圖。
右圖為12:00電離層圖。

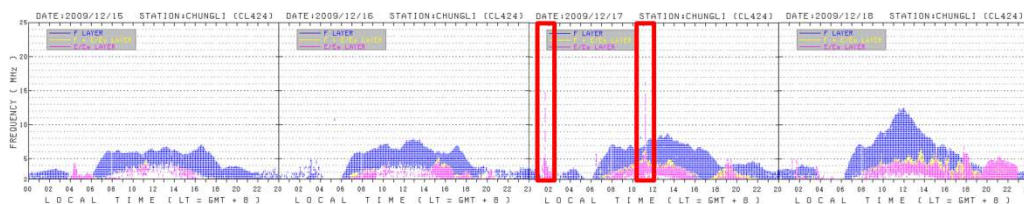
伍、研究步驟

- 一、從中央氣象局地震活動彙整資料庫中找尋規模 5.5(含)以上之地震。
- 二、再從國家通訊傳播委員會電離層觀測站中將上述地震震前 10 日的頻率特性圖擷取並尋找電離層電子濃度異常時段。並找出對應之 E 層(紅色區域，100~200km)濃度異常升高現象，以下以兩範例說明：

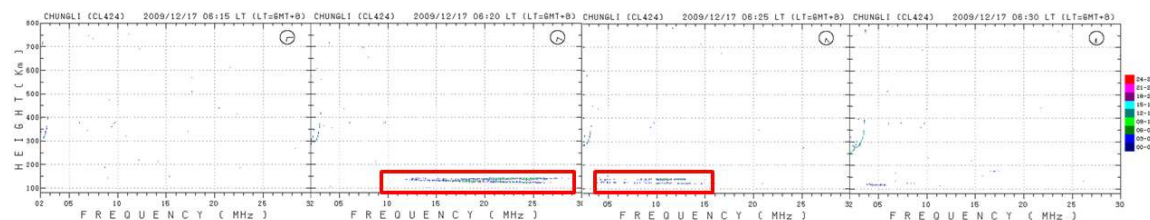
(一) 範例一 2009 年 12 月 19 日規模 6.9 地震

編號	年	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模
1579	2009	12 月 19 日 21 時 02 分	121.66	23.79	43.8	6.9

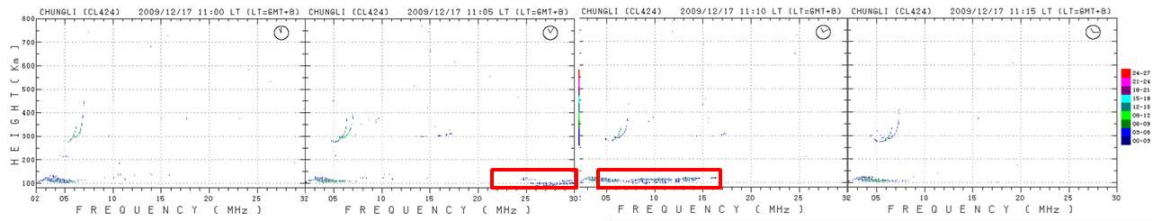
由震前 10 日頻率特性圖，如圖十，為其中前 5 日的頻率特性圖（震前第 5 日無資料）。可看出，於 2009/12/17/06：20~06：25 及 2009/12/17/11：00~11：15 出現異常。



圖十，2009 年 12 月 15~18 日頻率特性圖，於 2009/12/17/06：20~06：25 及 2009/12/17/11：00~11：15 出現異常以紅框標示。標示範圍內可看出粉紅色 E 層的反射頻率短時間內急速上升，並超過藍色的 F 層。



圖十一，為 2009/12/17/06：20~06：25 的異常濃度升高現象的電離層圖，在圖中以紅框標示。第一張圖無明顯反射訊號，第二張圖有明顯高頻率的反射訊號，第三張圖反射訊號頻率降低，第四張圖無明顯反射訊號，有明顯反射訊號的持續時間約為二十分鐘。

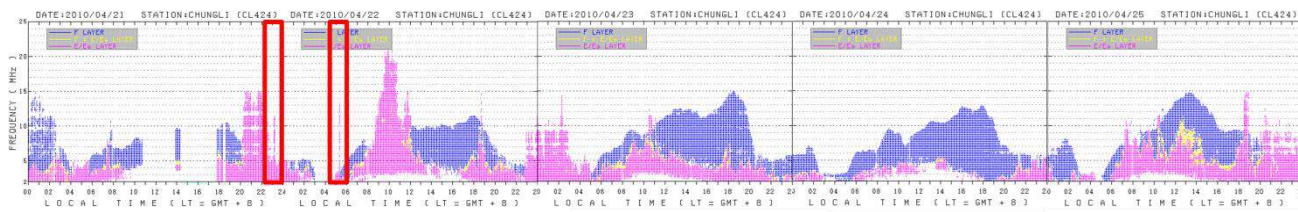


圖十二，為 2009/12/17/11:00~11:15 的異常現象，在圖中以紅框標示。

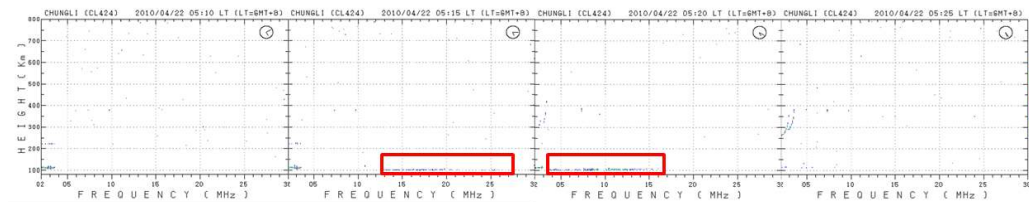
(二) 範例二 2009 年 12 月 19 日規模 6.9 地震

編號	年	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模
1821	2010	4 月 26 日 10 時 59 分	123.74	22.15	73.4	6.8

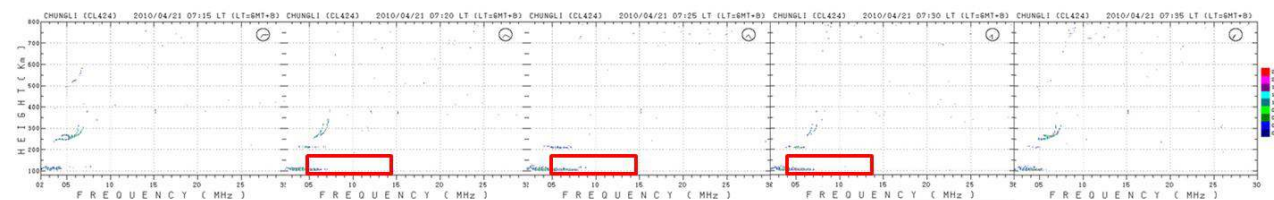
由震前 10 日頻率特性圖，如圖十三為其中前五日的頻率特性圖。可看出，於 2010/4/21/7:15~7:35 及 2010/4/22/5:10~5:25 出現異常。



圖十三，2010 年 4 月 21~25 日，於 2010/4/22/5:10~5:25 及 2010/4/21/7:15~7:35 出現異常以紅框標示。

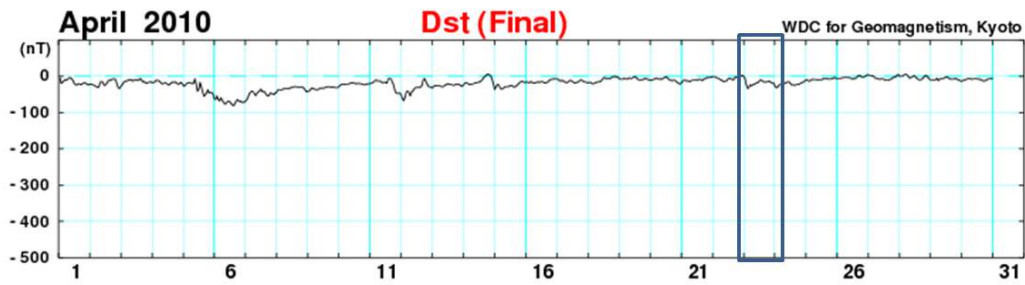


圖十四，為 2010/4/22/5:10~5:25 的異常現象，在圖中以紅框標示。



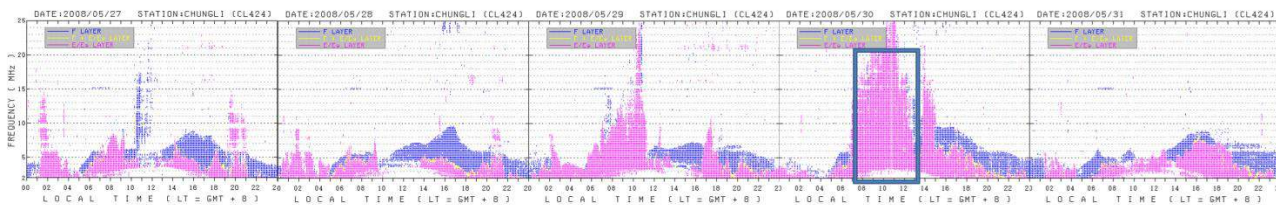
圖十五，為 2010/4/21/7:15~7:35 的異常現象，在圖中以紅框標示。

三、 去除地磁指數異常的日期。本實驗定義為若異常指數的絕對值指數超過 30，為地磁指數異常，並在表格上附註為磁暴。(如圖十六，其餘地震資料詳見附錄一)



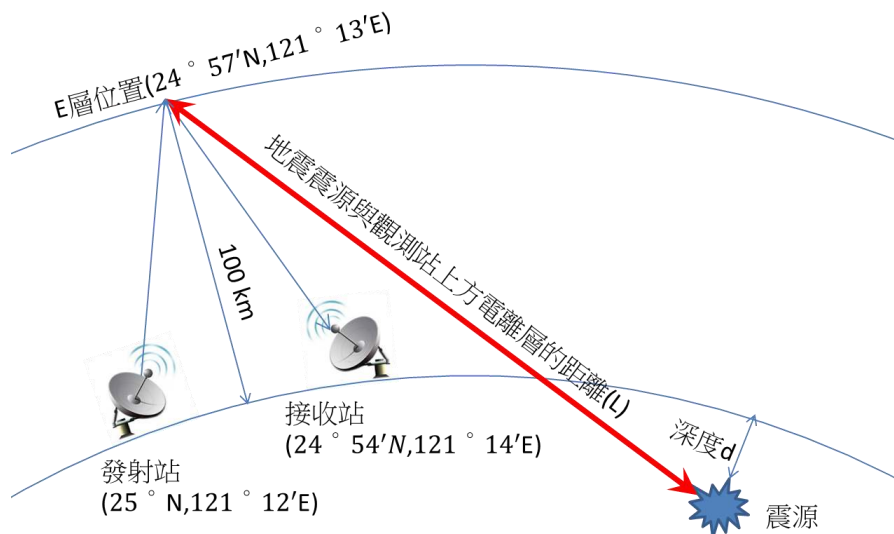
圖十六，地磁指數，橫軸為時間，單位為天，縱軸為地磁指數。

四、 去除散塊 E 層的影響。本研究將電離層濃度異常升高現象定義為電子濃度在電離層圖中突然急遽升高又急遽降低或電子濃度無中生有後在消失的過程，且此過程不超過一小時。若 E 層濃度異常升高超過一小時(12 張電離層圖)的現象(如下圖，其餘地震資料詳見附表)則定義為散塊 E 層，非地震的影響。



圖十七，2008 年 5 月 30 日 8:00~13:00，藍色框範圍是本研究所定義之散塊 E 層。

五、 地震與測站上方電離層距離的計算方法：先找出發射站與接收站的經緯度，並由兩測站中間地點的經緯度，計算出震央與該處的弧度。最後利用三角函數計算出震源與測站上方電離層 E 層的距離，如下圖所示。



圖十八，震源與測站上方電離層 E 層的示意圖。

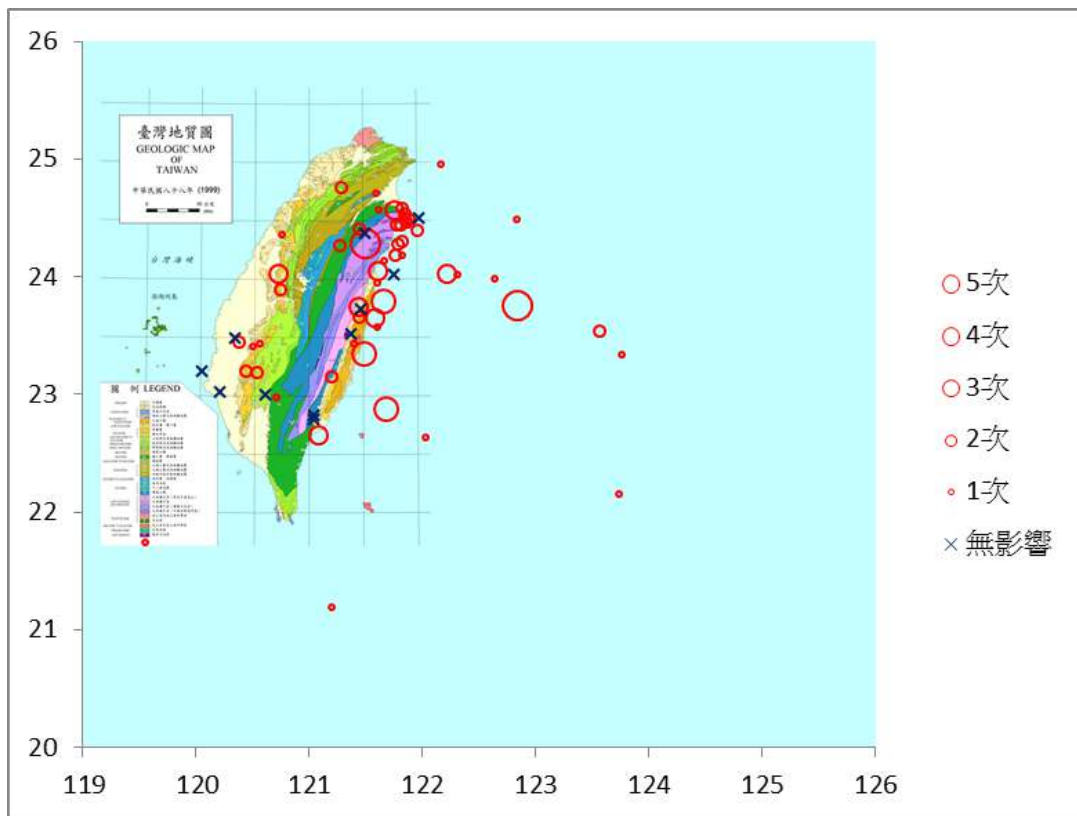
紅色線即為震源與測站上方電離層 E 層的距離

六、由上敘步驟一到五所觀測到的現象紀錄於表格中，兩範例整理後如表一所示，整體資料共 49 筆，詳見附錄一。

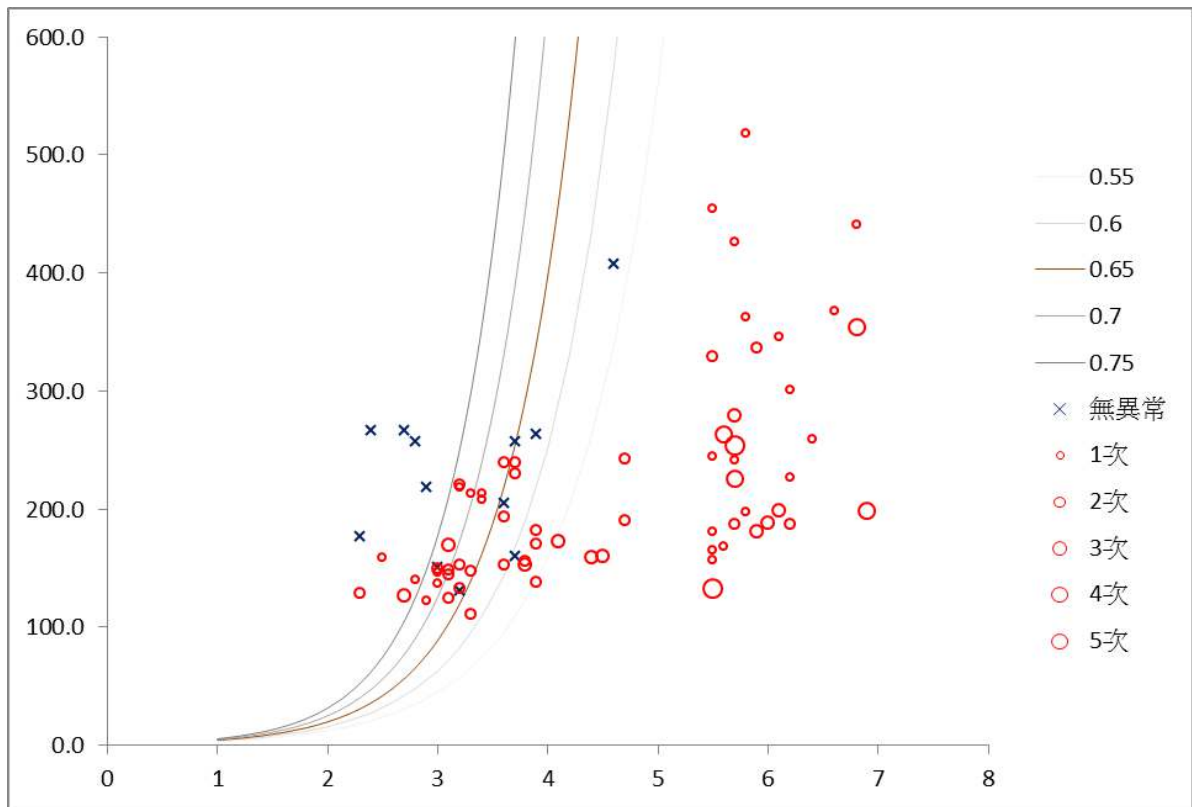
表一，地震震源與觀測站上方電離層的距離 R（單位為公里）。與異常時段的總表。

編號	地震時間	規模	經度	緯度	深度	R	異常時段
1579	2009/12/19 21:02	6.9	121.66	23.79	43.8	199.12	2009/12/17 06:20
							2009/12/17 11:00
							2009/12/18 02:50
							2009/12/18 19:00
1821	2010/4/26 10:59	6.8	123.74	22.15	73.4	440.76	2010/4/21 07:15 2010/4/22 05:10

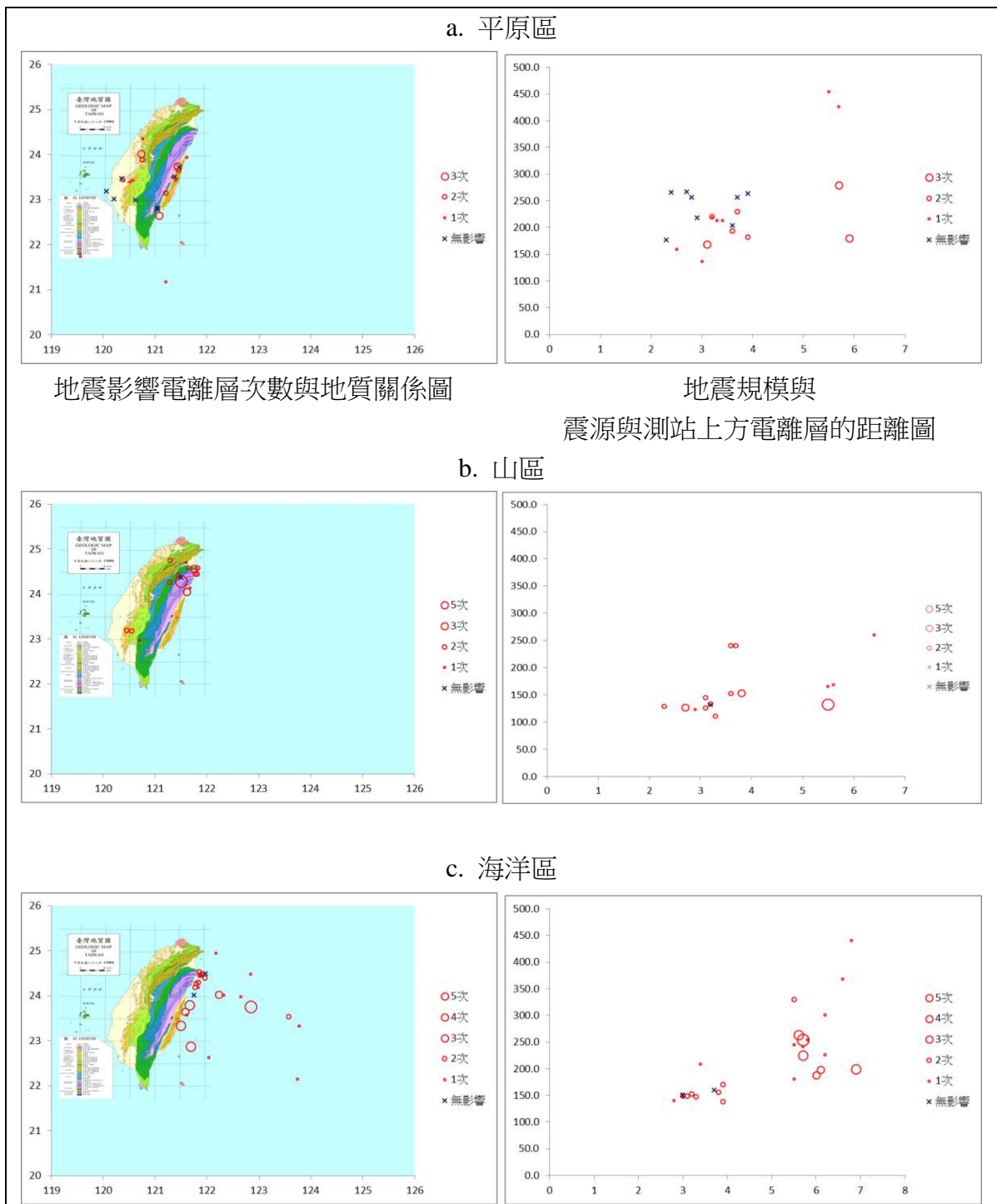
- 七、確定為濃度出現異常的現象，並觀察造成電子濃度異常的地震與地震跟測站間的距離、地震的規模、地震深度之間是否有關聯。
- 八、以規模 5.5 區分為兩部分，規模 5.5 以上的地震考慮於地震前後十日是否有規模大於 5.5 的地震，如果有則刪除之。規模 5.5 以下的地震則考慮於地震前後五日是否有發生其他地震（不限規模）。
- 九、將所彙整資料（見附錄二）配合地質圖，繪製成地震影響電離層次數與地質關係圖（圖十九），與地震規模與地震與測站上方電離層的距離圖（圖二十）
- 十、經比較圖十九與圖二十中的 X 標記無異常現象區得知，離測站距離越遠的地震若要能影響電離層 E 層，地震規模就需要越大。
- 十一、將震央區域依地質做篩選，將地震震央分為三區：平原區、山區、海洋區。繪製出地震影響電離層次數與地質關係圖與地震規模與地震與測站上方電離層的距離圖。



圖十九，地震影響電離層次數與地質關係圖。橫軸為經度，縱軸為緯度，紅圈大小表示五天內異常次數，藍叉代表沒有影響。由圖可看出影響電離層次數較多次的地震多位於奧底層(台灣北部山區，深褐色部分)、廬山層(中央山脈，綠色部分)以及卓蘭層(台灣中、南部丘陵，鵝黃色部分)。當中的廬山層主要為板岩系岩石構成，奧底層雖為砂岩系，但也有部分受到變質作用，而卓蘭層則為含雲母質的砂岩。而無影響電離層的地震多數都位於沖積層(花東縱谷、台灣南部平原區，淡黃色部分)。



圖二十，地震規模與震源與測站上方電離層E層距離圖。橫軸代表地震規模，縱軸代表距離，單位為公里。由圖推測地震前兆影響電離層E層範圍半徑R與地震型 $R = 10^{aM}$ 。圖中紅褐色的線段即為 $R = 10^{0.65M}$ ，其餘的線段由淺褐色到深褐色的公式分別為 $R = 10^{0.55M}$ 、 $R = 10^{0.6M}$到 $R = 10^{0.75M}$ 。



圖二十一，上面三組圖為 a.平原區、b.山區、c.海洋區的地震影響電離層次數與地質關係圖（左圖。橫軸為經度，縱軸為緯度，紅圈大小表示五天內異常次數，藍叉代表沒有影響）。與地震規模與震源與測站上方電離層的距離圖（右圖。橫軸代表地震規模，縱軸代表距離，單位為公里）。由圖可看出：山區的小規模地震（地震規模小於 5.5）影響電離層的次數較多；平原區小規模地震多不影響到電離層；海洋區小規模地震較不易影響到電離層。海洋區的大規模地震（地震規模大於 5.5）影響電離層的次數較多，而山區大規模地震大多不影響電離層。

陸、研究結果

一、將所彙整資料（見附錄二）繪製成地震影響電離層次數與地質關係圖（圖十九及圖二十一）。可看出：影響電離層次數較多次的地震多位於澳底層(台灣北部山區，深褐色部分)、廬山層(中央山脈，綠色部分)以及卓蘭層(台灣中、南部丘陵，鵝黃色部分)。其中的廬山層主要為板岩系岩石構成，澳底層雖為砂岩系，但也有部分受到變質作用，而卓蘭層則為含雲母質的砂岩。而無影響電離層的地震多數都位於沖積層(花東縱谷、台灣南部平原區，淡黃色部分)。由上述可推知，地震前兆釋放的電子若要能影響到電離層，與震央處地質結構有關聯。地震前兆電子釋放時，所在位置的岩質剛性越大，較容易影響到電離層；反之，所在位置剛性越小，越不容易影響到電離層。

若就小規模地震（地震規模小於 5.5）而言，可看出山區影響電離層的次數較多，而平原區小規模地震多不影響到電離層。應該是與山區的岩石多為火成岩或變質岩，而平原區多為沉積物有關。因此推知，地震若要能影響到電離層，與震央地形有關。而海洋區小規模地震較不易影響到電離層，應該是因為規模小的地震釋放出的電子也相當少，因此可能被海水吸收掉了。

若就大規模地震(地震規模大於 5.5)而言，可看出海洋區影響電離層的次數較多，而山區大規模地震大多不影響電離層。應該是因為大規模地震釋放出的電子多，海水無法完全吸收，因此剩餘的電子就可以影響電離層。

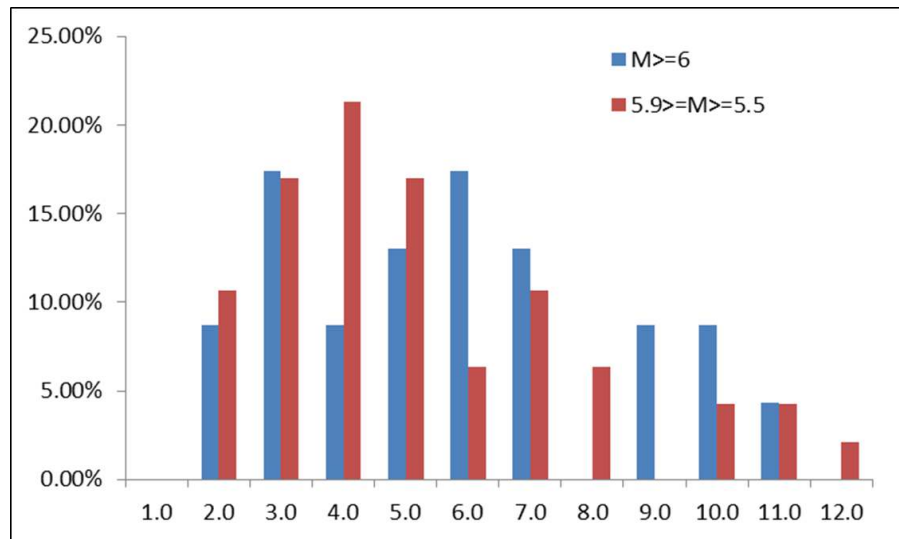
二、由圖二十推測地震前兆影響電離層 E 層範圍半徑 R 與地震規模 M 的關係模型，

$$R = 10^{aM}$$

位於擬合線左側因規模較小，而且距離較遠，因此難以觀測到異常現象，或異常現象出現的次數較少（圈圈越小），反之，擬合線右側部分因地震的規模較大，即使離測站較遠，仍能影響到電離層 E 層的電子濃度，因此可觀察到的次數最多。於圖二十中繪製 $a=0.55\sim 0.75$ 五條擬合曲線，經比較後選擇 $R = 10^{0.65M}$ 為最佳結果。

三、將附錄一資料分為規模大於 6 與 5.5~5.9 兩部分來探討，將磁暴天數太多的資料、

電離層圖缺少太多的資料以及地震發生的五日內有規模大於 5.5 地震的資料刪除後，再以一天為間格做計數統計製成地震規模與震前異常天數的比較圖（圖二十二），橫軸為異常時段單位為天數，縱軸為所佔電離層電子濃度有異常資料的百分比。由圖可看出無論地震規模是多少，影響電離層的旺盛期均為於地震發生前 3~5 天，而震發生前一天影響電離層的現象則較不顯著。另外可看出兩種規模的百分比並無太明顯差異，因此推測與規模無關。



圖二十二，大部分大規模地震（規模 5.5 以上）影響電離層的旺盛期均為於地震發生前 3~5 天，而震發生前一天影響電離層的現象則較不顯著。

柒、討論

- 一、地震前兆影響電離層的範圍與地震規模有關，因為芮氏規模越大，就代表地震釋放出來的能量越大，因此可以影響到電離層的範圍也就越遠。
- 二、推測跟台灣地表地形沉積物區與變質岩區有相關：較硬的岩石區因破裂多，或著岩石中含有雲母等較佳的導電礦物，而較能形成良好的電離層影響區。沉積物區則因較為鬆軟而難以破裂，因此較難以形成電離層影響區。
- 三、出現地震前兆影響電離層 F 層範圍半徑 R 與地震規模 M 的關係模型，可由下式呈現：

$$R = 10^{0.43M}$$

R 單位為公里 (km)。M 為芮氏規模 (Shiokawa,1999)。

但此公式為與電離層 F 有關的公式，無法得知 E 層是否也適用。經過研究推測地震前兆影響電離層 E 層範圍半徑 R 與地震規模 M 的關係模型，由下式呈現：

$$R = 10^{0.65M}$$

因為電離層 E 層較電離層 F 層為低而敏感，所以影響範圍 R 的參數較 E 層為大。

- 四、多數研究使用福衛三號的全球定位系統 (GPS) 來進行觀測，雖然觀測範圍廣，但時間解析度低。而本研究採用國家通訊傳播委員會電離層觀測站的資料，是以定點的方式觀察固定台灣上空的電離層變異，能觀測到的空間被侷限，但每 5 分鐘掃描一次，時間解析度較高。
- 五、地震發生前一天較無法觀測到影響電離層現象的原因，經推測應該是當時板塊正在蓄積能量，而形成寧靜期。

捌、結論

- 一、大規模地震（芮氏規模界於 5.5~6.9 之間）若是有影響到電離層，影響的旺盛期均位於震前 3~5 天；震前一天為寧靜期，而且發生的機率與規模大小並無明顯關係。
- 二、震央的地質結構與電離層 E 層電子受到地震前兆影響的次數有關。地震前兆電子釋放時，所在位置的岩質剛性越大，較容易影響到電離層；反之，所在位置剛性越小，越不容易影響到電離層。
- 三、台灣東部太平洋海域小規模地震較不易影響到電離層，推測為規模小的地震釋放出的電子也相當少，因此可能被海水所吸收掉了。而大規模地震釋放出的電子多，海水無法完全吸收完，因此剩餘的電子就可以影響電離層。
- 四、震源離測站距離越遠，若要能影響電離層 E 層，則地震的規模就需要越大。
地震前兆影響電離層 E 層範圍半徑 R 與地震規模 M 的關係模型為：

$$R = 10^{0.65M}$$

R 為半徑，單位為公里，M 為芮氏規模。

玖、未來展望

如能夠取得福衛三號 GPS 的電離層資料以進行比對，便能交叉比對本研究的資料的正確性。如果能再與全球的資料並進行比較，也許可比較出不同地理位置與地質結構是否也會有與影響電離層有關。

壹拾、 參考資料及其他

- 一、 卓裕榮(2002)，電離層地震前兆之研究
- 二、 劉正彥、陳玉英、陳佳宏(2008)，地震前兆之電離層時空監測(II)
- 三、 林鈺翔(2004)，利用全球定位系統觀測電離層地震前兆
- 四、 莊皓琨(2014)，台灣及中國災害性地震期間電離層 層峰濃度與全電子含量異常研究
- 五、 彭秉正(2003)，台灣地區 1996 及 2000 年電離層散狀 F 層與全球定位系統相位擾亂之比較
- 六、 李名揚(2008)電離層，讓無線電波轉個彎（科學人 2008 年 10 月號）
- 七、 蔡雯君(2003)，電離層 E 層場沿不規則體地區特性之研究
- 八、 林筵捷(2010)，模擬電離層 E 層電子濃度與散塊 E 層的發生機制
- 九、 楊國峰(2008)，電離層散塊 E 層不規則體結構與特性之研究
- 十、 陳承聖(2012)，電離層散塊 E 層不規則體之整合觀測研究
- 十一、 Shiokawa, K., Y. Otsuka, T. Ogawa, N. Balan, K. Igarashi, A. J. Ridley, D. J. Knipp, A. Saito, and K. Yumoto, 2002, A large-scale traveling ionospheric disturbance during magnetic storm of 15 September 1999, *J. Geophys. Res.*, 107, 1088, doi:10.1029/2001JA00245.
- 十二、 Kelly, M. C., *The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Electrodynamics*, Academic press, London, 487pp., 1989.
- 十三、 Davies, K., *Ionospheric Radio*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1990.
- 十四、 Geomagnetic Equatorial Dst index Home Page , <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>
- 十五、 國家通訊傳播委員會電離層觀測站，
<http://iono.ncc.gov.tw/ionosphere/01-about-03.aspx>
- 十六、 中央氣象局地震活動彙整，http://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/rtd_eq.htm
- 十七、 電離層（維基百科）
<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%94%B5%E7%A6%BB%E5%B1%82>

附錄一

地震規模 5.5 以上的資料與影響電離層異常次數統計

編號	資料紀錄	震央資料					影響電離層的次數			
		地震時間	規模	經度	緯度	深度 km	與測站距離 R km	異常時段	震前 10 天內	震前 5 天內
28		2007/1/25 18:59	6.2	122.03	22.63	25.8	300.8	2007/1/24 10:55 2007/1/25 18:59	2	1
270		2007/8/9 08:55	5.7	121.08	22.65	5.5	279.5	2007/8/2 02:30 2007/8/4 03:00 2007/8/4 06:00 2007/8/5 09:20 2007/8/7 04:25 2007/8/8 08:30 2007/8/9 08:55	7	3
314	五日內有規模 大於 5.5 地震	2007/9/7 01:51	6.6	122.25	24.28	54	200.9	2007/9/2 04:10 2007/9/2 06:00 2007/9/2 07:40 2007/9/4 01:55 2007/9/4 08:25 2007/9/7 01:51	6	5
315	五日內有規模 大於 5.5 地震	2007/9/7 01:55	5.5	122.32	24.27	57.8	207.9	2007/9/2 04:10 2007/9/2 06:00 2007/9/2 07:40 2007/9/4 01:55 2007/9/4 08:25 2007/9/7 01:55	6	5

555	2008/4/24 02:28	5.6	121.68	22.87	11.1	263.0	2008/4/20 10:35 2008/4/21 06:40 2008/4/22 03:45 2008/4/22 04:55 2008/4/24 02:28	5	4	
621	五日內有規模 大於 5.5 地震	2008/6/1 09:57	6.4	121.1	19.45	41.9	631.6	2008/5/27 03:25 2008/5/28 15:20 2008/5/30 02:00 2008/6/1 09:57	4	2
622	五日內有規模 大於 5.5 地震	2008/6/2 00:59	5.8	121.79	24.86	92.3	201.0	2008/5/28 15:20 2008/5/30 02:00 2008/6/1 05:20 2008/6/1 11:30 2008/6/2 00:59	5	4
873		2008/12/2 11:16	5.7	121.49	23.34	31.7	225.3	2008/11/27 13:45 2008/11/28 01:25 2008/11/28 08:40 2008/11/29 07:15 2008/12/2 11:16	5	4
1075		2009/5/27 06:27	5.7	119.56	21.74	55.1	426.6	2009/5/23 10:35 2009/5/27 06:27	2	1

1256	2009/7/14 02:05	6	122.22	24.02	18.1	187.9	2009/7/7 09:00 2009/7/8 02:55 2009/7/11 07:05 2009/7/11 07:40 2009/7/11 09:00 2009/7/14 02:05	6	3
1342 資料缺乏	2009/7/30 00:53	5.8	120.48	22.05	41.3	362.2	2009/7/26 03:00 2009/7/30 00:53	2	1
1387 資料缺乏	2009/8/17 08:05	6.8	123.88	23.37	43.3	354.3	2009/8/12 10:40 2009/8/12 10:55 2009/8/14 09:15 2009/8/15 09:15 2009/8/17 08:05	5	4
1388 資料缺乏	2009/8/17 18:10	5.9	123.67	23.32	31.6	336.7	2009/8/12 10:40 2009/8/12 10:55 2009/8/14 09:15 2009/8/15 09:10 2009/8/17 18:10	5	2
1396	2009/8/20 22:18	5.5	123.57	23.53	61.4	329.5	2009/8/17 08:00 2009/8/19 12:15 2009/8/20 22:18	3	2
1441	2009/10/4 01:36	6.1	121.58	23.65	29.2	198.4	2009/9/29 06:50 2009/9/30 06:25 2009/10/1 06:45 2009/10/4 01:36	4	3

1503 資料缺乏	2009/11/5 17:32	6.2	120.72	23.79	24.1	187.1	2009/11/4 02:15 2009/11/5 17:32	2	2
1506 資料缺乏	2009/11/5 19:34	5.7	120.76	23.77	24	187.6	2009/11/2 06:10 2009/11/4 02:15	2	2
1543	2009/11/15 22:47	5.5	122.17	24.95	125.4	244.9	2009/11/13 13:40 2009/11/6 22:35 2009/11/5 05:10	3	1
1579	2009/12/19 21:02	6.9	121.66	23.79	43.8	199.1	2009/12/17 11:00 2009/12/18 02:50 2009/12/18 19:00 2009/12/19 21:02	4	4
1659	2010/1/5 03:27	5.5	121.83	24.18	46.1	180.8	2010/1/5 03:27	1	1
1689	2010/2/7 14:10	6.6	123.77	23.33	88	367.8	2010/2/7 14:10	1	1
1706 磁暴影響	2010/2/22 13:21	5.6	122.97	24.05	35.6	245.7	2010/2/22 13:21	1	1
1707 磁暴影響	2010/2/26 09:07	5.8	122.87	23.69	52.1	267.1	2010/2/22 04:45 2010/2/26 09:07	2	2
1714	2010/3/4 08:18	6.4	120.71	22.97	22.6	259.2	2010/2/25 19:00 2010/2/28 05:05 2010/3/4 08:18	3	1
1821	2010/4/26 10:59	6.8	123.74	22.15	73.4	440.8	2010/4/22 05:10 2010/4/26 10:59	2	1
1875 磁暴影響	2010/6/15 08:31	5.5	121.62	24.04	16.7	160.6	2010/6/15 08:31	1	1
2078 磁暴影響	2010/10/4 21:28	6.6	125.51	23.97	35	470.2	2010/10/4 21:28	1	1
2216 磁暴影響	2010/11/21 20:31	6.1	121.69	23.85	46.9	197.8	2010/11/20 00:10 2010/11/21 20:31	2	2

2311 資料缺乏	2011/2/1 16:16	5.5	121.8	24.21	18.3	156.4	2011/1/25 21:25 2011/1/29 01:30 2011/2/1 16:16	3	1
2358	2011/2/15 15:18	5.5	121.2	21.18	71.2	454.5	2011/2/13 06:00	1	1
2414 磁暴影響	2011/3/20 16:00	5.8	121.38	22.44	27.5	309.5	2011/3/15 20:40	1	1
2487 五日內有規模大於 5.5 地震	2011/4/29 21:12	5.9	122.07	21.35	178.1	493.7	2011/4/27 15:50 2011/4/20 19:00	2	1
2488 五日內有規模大於 5.5 地震	2011/4/30 16:35	5.8	121.81	24.65	75	188.0	2011/4/27 15:50 2011/4/20 19:00	2	1
3091 磁暴影響	2012/2/26 10:35	6.4	120.75	22.75	26.3	281.4	2012/2/23 19:20 2012/2/17 17:40	2	1
3195	2012/4/19 09:58	5.5	121.67	24.13	29.1	165.2	2012/4/12 22:50 2012/4/17 18:00 2012/4/19 09:58	3	1
3284 磁暴影響	2012/6/10 05:00	6.6	122.31	24.46	69.9	210.1	2012/6/9 06:05 2012/5/30 22:45	2	1
3719	2013/1/7 14:49	5.7	122.84	24.48	69.4	241.8	2013/1/1 05:25 2013/1/2 21:30 2013/1/7 14:49	3	1
3897 磁暴影響	2013/3/27 10:03	6.2	121.05	23.9	19.4	168.9	2013/3/23 19:10	1	1
3991 資料缺乏	2013/5/21 16:25	6.1	123.69	23.33	53.1	346.1	2013/5/20 22:55 2013/5/11 19:05	2	1
4016 磁暴影響	2013/6/2 13:43	6.5	120.97	23.86	14.5	169.8	2013/5/28 12:50	1	0

4025	2013/6/8 00:38	6.2	122.65	23.98	35.3	226.7	2013/6/1 20:25 2013/6/2 09:00 2013/6/2 11:20 2013/6/4 19:15 2013/6/8 00:38	5	1
4084	2013/7/15 21:41	5.7	122.84	23.76	40	254.4	2013/7/12 06:30 2013/7/13 02:35 2013/7/13 03:30 2013/7/13 11:00 2013/7/13 11:55 2013/7/15 21:41	6	5
4087	2013/7/16 18:11	5.5	121.5	24.28	4.9	132.5	2013/7/12 06:30 2013/7/13 02:35 2013/7/13 03:30 2013/7/13 11:00 2013/7/13 11:55 2013/7/16 18:11	6	5
4490	2014/2/22 04:25	5.6	121.6	24.7	60.9	167.9	2014/2/17 16:00	1	1
4525	2014/3/19 20:19	5.8	122.32	24.01	23	197.2	2014/3/15 04:20	1	1
4619	2014/5/21 08:21	5.9	121.43	23.74	16.5	180.5	2014/5/13 18:25 2014/5/13 19:20 2014/5/14 11:10 2014/5/16 10:45 2014/5/18 18:20 2014/5/20 17:40 2014/5/21 08:21	7	3

4949 資料缺乏	2014/11/21 11:29	5.8	120.01	20.71	71.3	518.6	2014/11/19 13:40	1	1
-----------	------------------	-----	--------	-------	------	-------	------------------	---	---

附錄二

兩份資料的匯集，包含 1. 地震規模 5.5 以上，震前 10 天都沒有規模大於 5.5 的地震。2. 地震規模小於 5.5，震前四天沒有地震的資料。計數電離層異常次數。

編號	地震時間	規模	經度	緯度	深度	與測站距離 R	5 天內 異常次數	磁暴	缺資料
28	2007/1/25 18:59	6.2	122.03	22.63	25.8	300.8	1		
92	2007/3/8 23:37	4.7	121.91	24.54	70.4	189.9	2	1	
167	2007/5/6 04:28	3	121.89	24.48	21.9	149.5	2		
172	2007/5/16 03:54	3.4	121.4	23.43	26.1	213.0	1		
265	2007/8/1 20:55	3.7	121.2	23.15	8.2	229.5	2		
270	2007/8/9 08:55	5.7	121.08	22.65	5.5	279.5	3		
287	2007/8/21 02:03	2.3	121.82	24.58	5.1	128.6	2		
377	2007/11/8 16:32	4.4	122.26	24.98	18.7	158.9	3		1
383	2007/11/15 09:50	4.5	121.48	24.06	21.6	159.8	3		
425	2007/12/25 04:38	3.1	120.73	24.02	23	169.1	3		1
429	2008/1/5 03:52	3.1	121.81	24.44	18	144.4	2	2	
435	2008/1/13 08:56	3.6	120.45	23.19	10.1	239.7	2		
528	2008/3/24 06:47	3.2	120.51	23.4	10.4	218.7	1		
529	2008/3/28 06:34	2.8	121.86	24.48	12.1	140.2	1	2	
549	2008/4/19 21:17	3.3	120.57	23.43	9.1	213.4	1		
555	2008/4/24 02:28	5.6	121.68	22.87	11.1	263.0	4		
826	2008/11/6 15:20	3.9	120.75	23.88	28.5	182.4	2		
873	2008/12/2 11:16	5.7	121.49	23.34	31.7	225.3	4		
951	2009/1/29 17:41	2.4	120.21	23.01	13.5	266.6	0		
1036	2009/4/11 01:04	3.6	121.78	24.44	28.9	152.3	2		
1043	2009/4/19 12:44	3	120.76	24.35	9	136.7	1		
1066	2009/5/15 22:42	3.2	121.77	24.18	12.4	152.7	2		
1075	2009/5/27 06:27	5.7	119.56	21.74	55.1	426.6	1		
1077	2009/5/27 19:40	3.8	121.96	24.39	20.5	155.6	2		
1256	2009/7/14 02:05	6	122.22	24.02	18.1	187.9	3		
1342	2009/7/30 00:53	5.8	120.48	22.05	41.3	362.2	1		
1387	2009/8/17 08:05	6.8	123.88	23.37	43.3	354.3	4		
1388	2009/8/17 18:10	5.9	123.67	23.32	31.6	336.7	2		
1396	2009/8/20 22:18	5.5	123.57	23.53	61.4	329.5	2		
1407	2009/8/27 20:14	4.1	121.46	23.85	17.9	172.7	3		
1419	2009/9/8 17:41	3.8	121.61	24.05	7	152.7	3		
1434	2009/9/23 18:16	3.9	121.85	24.53	50.8	170.5	2		
1441	2009/10/4 01:36	6.1	121.58	23.65	29.2	198.4	3		
1470	2009/10/13 14:15	2.5	121.61	23.94	4	159.2	1		

1503	2009/11/5 17:32	6.2	120.72	23.79	24.1	187.1	2		
1506	2009/11/5 19:34	5.7	120.76	23.77	24	187.6	2		
1543	2009/11/15 22:47	5.5	122.17	24.95	125.4	244.9	1		
1578	2009/12/15 10:10	3.1	121.83	24.3	12.8	148.2	2		
1579	2009/12/19 21:02	6.9	121.66	23.79	43.8	199.1	4		
1659	2010/1/5 03:27	5.5	121.83	24.18	46.1	180.8	1		
1689	2010/2/7 14:10	6.6	123.77	23.33	88	367.8	1		
1714	2010/3/4 08:18	6.4	120.71	22.97	22.6	259.2	1		
1752	2010/3/13 17:15	3.7	120.62	22.99	17.8	257.1	0	1	
1821	2010/4/26 10:59	6.8	123.74	22.15	73.4	440.8	1		
1837	2010/5/9 10:20	3.2	121.28	24.26	7.7	133.1	2	1	
2233	2010/11/30 19:44	2.9	120.35	23.47	9.3	218.1	0		
2268	2010/12/27 17:01	3.7	120.55	23.18	14.7	239.6	2		
2270	2011/1/2 07:34	3.9	121.86	24.46	8.7	138.4	2	1	1
2291	2011/1/17 14:32	3	121.97	24.49	19.4	151.0	0		
2311	2011/2/1 16:16	5.5	121.8	24.21	18.3	156.4	1		
2354	2011/2/10 21:01	4.7	122.51	24.65	101.1	242.0	2	1	
2358	2011/2/15 15:18	5.5	121.2	21.18	71.2	454.5	1		
2717	2011/8/17 16:09	2.7	121.75	24.56	5.2	126.3	3		
2930	2011/12/25 20:31	3.6	121.37	23.51	24.1	204.5	0		
3195	2012/4/19 09:58	5.5	121.67	24.13	29.1	165.2	1		
3198	2012/4/20 03:21	2.3	121.46	23.72	7.7	177.1	0		
3474	2012/7/31 09:50	3.3	121.29	24.75	7.9	110.6	2	1	
3476	2012/8/5 09:11	3.2	120.38	23.44	11.1	220.3	2		
3518	2012/8/23 12:15	2.7	121.04	22.78	7.2	267.0	0		
3552	2012/9/14 15:28	3	121.87	24.43	17.1	146.8	1		
3630	2012/11/14 09:26	3.2	121.5	24.37	9.8	131.0	0		
3719	2013/1/7 14:49	5.7	122.84	24.48	69.4	241.8	1		
3720	2013/1/8 13:00	3.9	121.04	22.82	8.8	263.6	0		
3743	2013/1/22 07:02	3.7	121.75	24.01	6.9	159.9	0	2	1
3958	2013/5/10 12:27	3.1	121.45	24.4	5.8	125.0	2		
3991	2013/5/21 16:25	6.1	123.69	23.33	53.1	346.1	1		
4025	2013/6/8 00:38	6.2	122.65	23.98	35.3	226.7	1		
4084	2013/7/15 21:41	5.7	122.84	23.76	40	254.4	5		
4087	2013/7/16 18:11	5.5	121.5	24.28	4.9	132.5	5		
4109	2013/7/29 12:00	3.4	121.61	23.57	33.1	208.1	1		
4221	2013/10/15 21:22	2.9	121.62	24.57	7.6	122.9	1	1	
4490	2014/2/22 04:25	5.6	121.6	24.7	60.9	167.9	1		
4516	2014/3/10 10:56	2.8	120.06	23.19	13.2	256.9	0		
4525	2014/3/19 20:19	5.8	122.32	24.01	23	197.2	1		

4561	2014/4/13 04:05	3.6	121.45	23.65	24.9	193.7	2	
4619	2014/5/21 08:21	5.9	121.43	23.74	16.5	180.5	3	
4865	2014/9/30 00:44	4.6	121.28	21.56	48.8	407.5	0	
4949	2014/11/21 11:29	5.8	120.01	20.71	71.3	518.6	1	
4964	2014/11/26 07:14	3.3	121.79	24.27	11.9	147.6	2	1

【評語】 040510

1. 以高時間解析度之觀測站來探討電磁波（層）異常跟地震前兆之關，有創意且方法也合適。
2. 建議：部分圖表太小，不易閱讀。且對前人研究及文獻之引用不夠明確，可以改進。另外對於研究結果如何應用也可以再加強。