

福爾摩沙衛星三號對電離層太空天氣研究影響

國立成功大學地球科學系 林建宏

一、電離層太空天氣對民生之影響

電離層位於距離地表上空 100 公里至約 2000 公里高度，主要成份為氧離子與少部份氫與氮離子。傳統電離層對人類生活的影響主要是通訊用之高頻無線電傳播，隨著高頻無線電通訊式微，電離層的重要性一度受到強烈的挑戰。近年來，隨著全球定位系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)的廣泛應用、燃油價格高漲使得航空公司增加極區飛航路徑、商業太空旅行的發展，電離層相關研究再度受到重視。我國於 2006 年發射之福爾摩沙衛星三號星系，包含六顆搭載 GPS 接收機之微衛星，利用接收 GPS 訊號受電離層與低層大氣折射指數影響產生之訊號偏折或相位變化，推估電離層電子密度與低層大氣溫度隨高度變化。由於福衛三號進行之電離層觀測可觀測全球電離層電子密度隨高度變化，在過去無法藉由其他地面或衛星觀測達到此一觀測範圍，對電離層研究帶來重大影響，並得到許多新發現與突破，本文將簡介福衛三號在電離層研究之成果以及影響性。

二、福衛三號觀測電離層電漿結構新發現

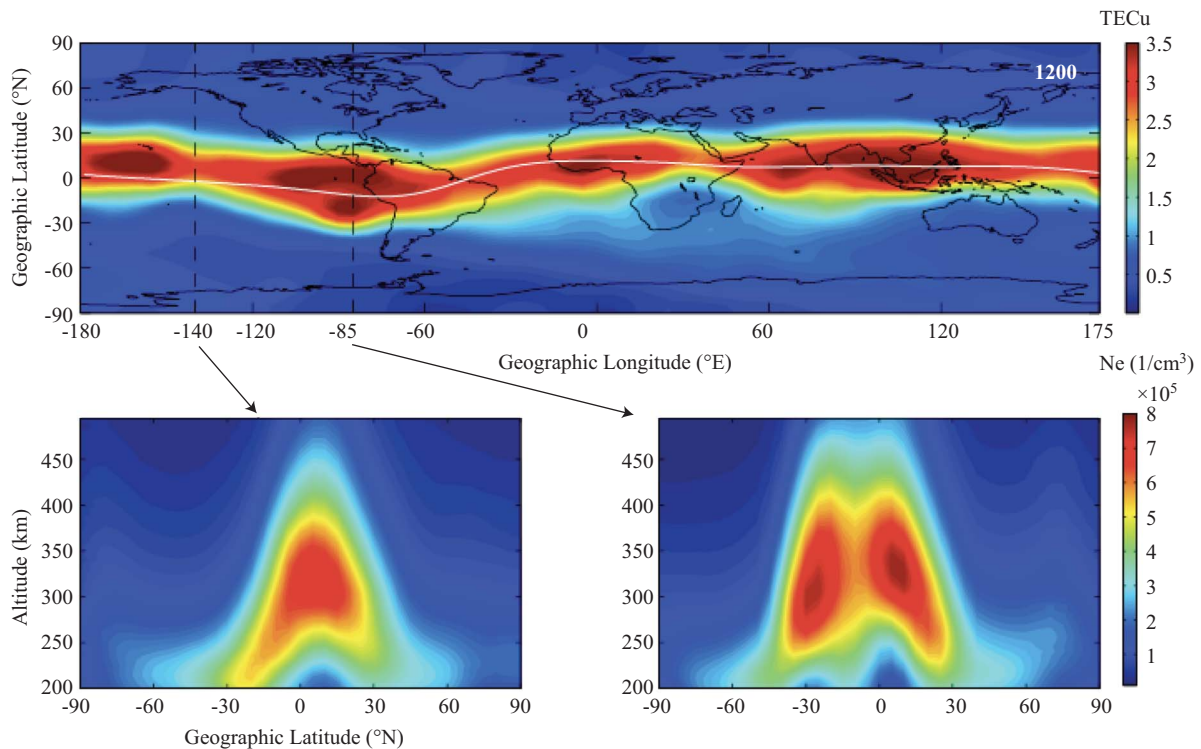
1. 低層大氣與太空天氣交互作用

由於磁暴對電離層影響一直是太空科學家重點研究議題，特別是經過太陽劇烈變動的 23 太陽活動週期，太空科學家從中發現許多新現象，因此福衛三號電離層酬載任務原先預期將重點研究磁暴擾動對電離層之效應。然而當福衛三號星系在 2006 年發射後，伴隨而來的卻是遠較科學家預期長時間的太陽活動極小期，2007-2011 年期間，太陽的活動異常的寧靜，曾經長達數個月幾乎沒有磁暴發生，與第 23 週期太陽活動極大期間，每週皆有磁暴發生的情形有很大的差距，然而也因為此一絕佳機會，科學家得以評估低層大氣對太空環境之影響。由於磁暴效應一般認為會大規模且快速的影響全球電離

層電漿結構，因此科學家在檢視其他效應是否影響電離層時，往往預期其他效應對電離層影響不如磁暴效應，受到此一先入為主觀念，科學家在研究大氣擾動（颱風、龍捲風）、地殼變動（地震、火山爆發、海嘯）、人造擾動（火箭發射、核彈試爆）對電離層影響時，往往會排除磁暴事件，而單一磁暴事件對電離層影響短則 2-3 天，多則 5-7 天，因此在第 23 太陽活動週期每週有磁暴之情況下，要能夠研究低層大氣對電離層效應並排除磁暴效應疑慮，具有高度困難，因此 2007-2011 年的太陽寧靜期，對於研究低層大氣對電離層影響有很大的助益。

低層大氣對電離層影響在 2006 年後受到熱烈的討論，首先，科學家發現低緯度赤道附近的電離層赤道異常電漿結構有出乎原先預期的四個電漿密度增強區域位於不同經度。所謂的電離層赤道異常電漿結構(equatorial ionization anomaly, EIA)主要來自於低緯度電離層於白天受到熱氣球層東向風場影響而產生東向電場，該電場與南北向的地球磁場作用產生一垂直作用力，使電漿垂直地球磁力線漂移，並如噴泉般將地磁赤道的電漿傳輸到赤道兩側的低緯度地區，形成赤道兩側上空電漿大於赤道上空的異常電漿結構，該結構為一常態存在之電離層電漿結構，但因與理論預期相異，因此發現此一現象之科學家將之命名為赤道異常結構，台灣正位於北半球電離層赤道異常區。在過去，沿經度變化之電離層電漿結構一般認為與地磁傾角(inclination)與偏角(declination)有關，但 2006 年發現之四個電漿密度較大的區域，很巧合的跟低層大氣降雨明顯的區域處於相近的經度範圍，圖一顯示利用我國福爾摩沙衛星三號空載 GPS 接收機進行的電離層掩星觀測結果，該結果顯示赤道低緯度電離層電子含量在非洲中部，東南亞，中太平洋，南美洲呈現增強現象，這些區域恰好位於降雨以及大氣水氣較大的經度區域[1]。

進一步研究發現這些電離層電漿密度增強



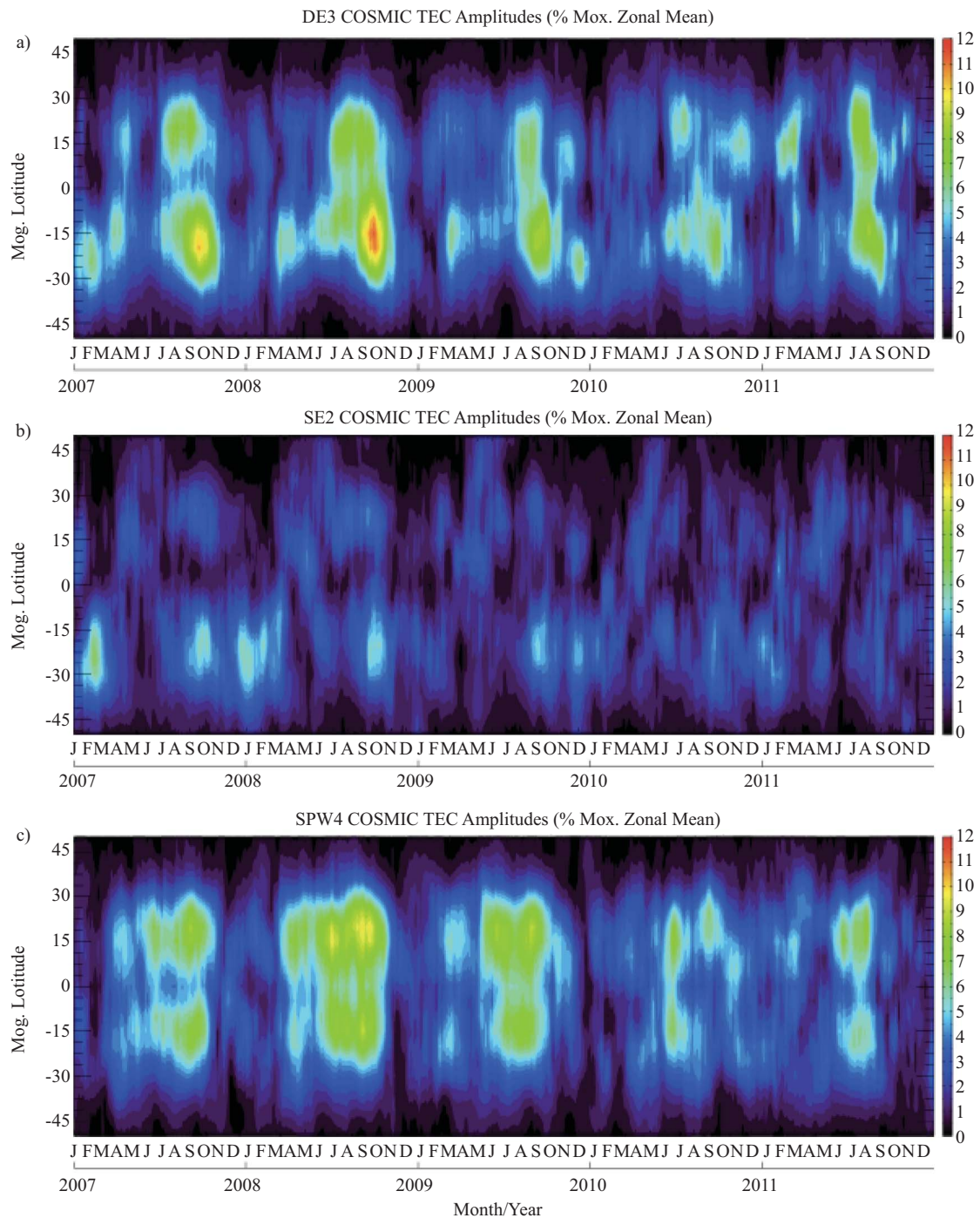
圖一 福爾摩沙衛星三號觀測赤道低緯度電離層 F 層電子含量在非洲中部，東南亞，中太平洋，南美洲呈現增強現象（上圖），電子含量較高的區域有著較強大的赤道電漿異常峰(equatorial ionization anomaly crest)，有著較為南北對稱且增強之電漿密度峰值分布於較高緯度（下圖）

區域與對流層大氣中的水氣所釋放的潛熱有關。對流層頂釋放的潛熱會產生大氣波動，此大氣波動會往高層大氣傳播，並因為高層大氣的大氣密度減小，而產生較大的振幅，由於此大氣波動來源為水氣吸收太陽輻射所釋放的潛熱產生，因此該波動具有全球性尺度，與太陽照射天頂角相關(local time variation)，以及具週期性等特性，就有如海洋潮汐所具有的特性，因此我們將之稱為大氣潮汐。大氣潮汐產生後主要分成兩種類型，一種是傳播方向（westward，往西方向）與速度和太陽對地球運動一致的太陽同步(Sun synchronized)大氣潮汐，我們將之稱為太陽同步潮汐(migrating tides)，其他不屬於此類太陽同步的大氣潮汐則稱為非太陽同步潮汐(nonmigrating tides) [2]。對流層頂潛熱產生的大氣潮汐為非太陽同步潮汐中 24 小時週期、東向波數為 3 的潮汐(diurnal eastward wave-3, DE3)，此潮汐傳播至熱氣層與電離層底層，影響電離層電場產生，並進一步影響電離層赤道異常結構[3, 4]，此效應一般而言在 3-4 以及 6-10 月份

最為明顯[5-7]。

除了 DE3 潮汐，利用福衛三號觀測也發現靜態沿經度方向波數為 4 之行星波(stationary planetary wave-4, SPW4)也是造成此一現象的重要因素之一，Chang *et al.* [8]利用 2007-2011 之福衛三號電離層觀測進行潮汐分解並比較各潮汐分量之相對強度（圖二），發現除了 DE3 潮汐之外，SPW4 與 DE3 有著相近的強度，兩者皆是產生如圖一顯示沿經度方向四個電離層電漿增強區域現象的主要潮汐分量。

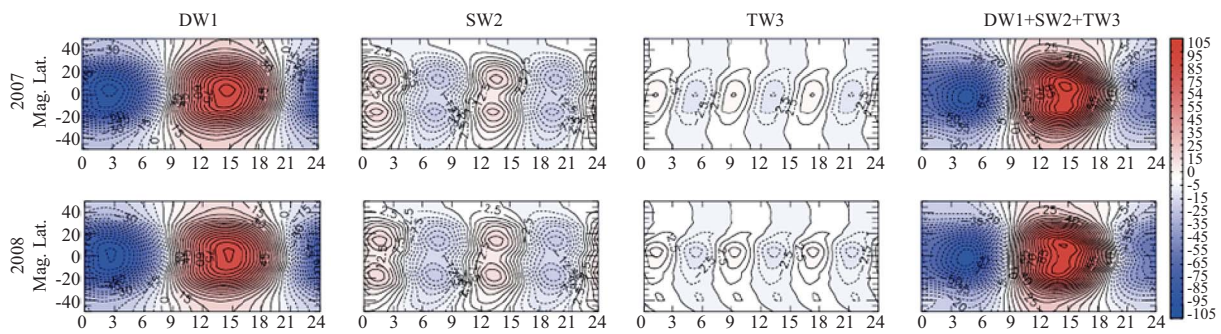
除了對流層效應外，科學家在 2008-2010 年期間，北半球冬天時（特別是 1-2 月），利用位於南美洲地磁赤道附近的異調散射雷達(Incoherent Scattering Radar, ISR)觀測發現，產生赤道異常電漿結構之電漿垂直漂移速度於平流層瞬時暖化(stratospheric sudden warming, SSW)期間，提早兩個小時開始產生垂直向上增強（由原先的 0800 LT 提前至 0600 LT）之漂移速度，並提早兩小時於 1400 LT 開始反轉成垂直向下 [9]。此一效應使得電離層赤道異常峰在 0800 LT



圖二 福爾摩沙衛星三號 2007-2011 年觀測資料與產生經度方向 4 個電離層電子含量增強區有關之大氣／電離層潮汐相對強度，(a) 24 小時週期波-3 東向傳播(diurnal eastward wave-3)、(b) 12 小時週期波-2 東向傳播(semidiurnal eastward wave-2) 之非太陽同步潮汐、(c) 靜態波數 4 行星波(stationary planetary wave-4, SPW4)。圖摘自[8]

即已完整建立，並且在 1400 LT 因為電漿漂移造成大量電漿傳輸至較低高度，並經由與較為豐富之中性大氣分子結合造成電漿密度減少[10, 11]。
 利用福衛三號觀測電離層電子密度並分析

SSW 前後不同大氣潮汐之變化情形，我們發現所有的太陽同步潮汐都有往較早當地時間位移的情形，比較瞬時暖化前後，24 小時(diurnal westward wave-1, DW1)、12 小時(semidiurnal



圖三 利用福爾摩沙衛星三號 2007-2008 年電離層電子含量觀測分解之電離層潮汐隨緯度與當地時間變化，可以看出 24 (DW1)、12 (SW2)、8 (TW3) 小時電離層太陽同步潮汐分別代表整體電離層異常峰電漿分布與太陽照射關係、赤道異常峰值南北對稱以及強度、赤道電漿強度。圖摘自[14]

westward wave-2, SW2)、8 小時(diurnal westward wave-1, DW1) 太陽同步潮汐的變化可以解釋 80% 以上 SSW 產生的電離層變化[12]，此結果可成功解釋其他文獻利用區域地面 GPS 站之觀測，為福衛三號觀測研究平流層、電離層交互作用的重要貢獻，其中 SW2 潮汐的變化是由形成 SSW 之行星波改變平流層臭氧濃度，進而造成 SW2 潮汐在 SSW 後產生增強現象[13]。

2. 多年期觀測發現電離層潮汐效應之物理意義

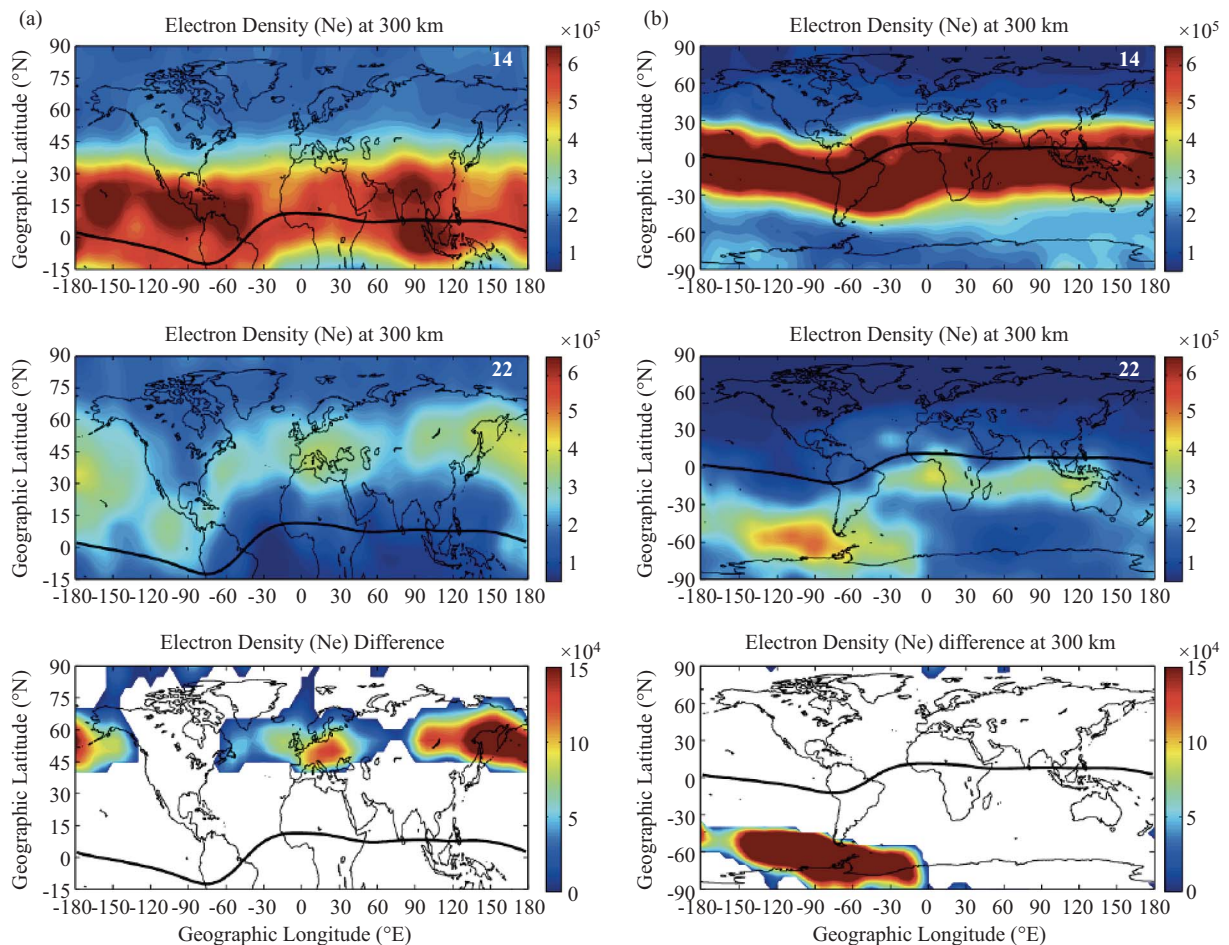
對流層、平流層效應產生之大氣潮汐主要是呈現於中性大氣之溫度場與風場，在適當的背景風場情形下，大氣潮汐隨高度往上传播至熱氣球層-電離層系統，一般認為大部份的潮汐僅可傳播至電離層底部，影響電離層發電效應，進而影響電子密度分布，僅有少數潮汐可傳播至電離層 F 層並直接影響電子密度。由於電離層電子密度除了潮汐影響外，也受到地球磁場傾角、偏角、強度影響，因此當我們以運用於中性大氣之潮汐分解分析電子密度時，電離層的各個潮汐分量之物理意義將可能不同於中性大氣之各個潮汐分量。

利用 2007-2011 年福衛三號觀測資料以及理論電離層模擬，Chang *et al.* [14] 發現低緯度電離層赤道異常區之 24 小時太陽同步潮汐 (DW1) 與太陽照射產生電漿相關，12 小時太陽同步潮汐 (SW2) 則與電離層噴泉效應與赤道異常峰強度相關，8 小時太陽同步潮汐 (TW3) 則與 SW2 呈現相

反強度，並代表赤道異常區在地磁赤道上空因為噴泉效應將電漿往較高緯度傳輸而有較弱的電漿密度相關 (圖三)。瞭解電離層潮汐分量相對應之物理意義對於研究大氣、電離層耦合有重大意義。

3. 發現電離層中緯度夏季異常現象

1950-60 年代，太空科學家在南極的電離層雷達觀測中發現一個很特別的異常現象，該異常顯示在南極的威德海區域附近，夏季電離層常態存在一異常現象，此異常現象與理論預期太陽天頂角 (zenith angle) 較小時 (白天) 有較大之電子密度，天頂角較大時 (夜晚) 有較小電子密度呈現相反趨勢，由於當時的科學家僅在南極威德海 (Weddell Sea) 區域發現這一現象，因此將此現象命名為威德海異常 [15, 16]。在衛星觀測廣泛應用後，Horvath and Essex [17] 利用海洋測高衛星 TOPEX 搭載的電離層全電子含量觀測，發現威德海異常並不僅僅局限於南極的威德海區域，該異常現象也在東太平洋與澳洲東部被觀測到，推測與地球磁赤道在威德海至澳洲東部區域內位於地理赤道的南方有關。然而 TOPEX 衛星的觀測並不足以解釋該現象之生成機制，我們利用福衛三號電離層掩星觀測，首次觀測該異常現象之三維電漿結構，經由電漿垂直結構觀測提出可能之物理機制 [18]，同時我們也在北半球發現類似之電漿結構 (圖四)，有別於南半球僅局限於南極威德海附近，北半球的相對應電漿結構同時存



圖四 福衛三號觀測電離層中緯度夏季異常現象於(a)北半球與(b)南半球之分布。最上列、中列分別為1400、2200 LT 電子密度於北半球夏天(左)、南半球夏天(右)之分布,相減結果(下列)顯示夜晚電子密度高於白天之位置

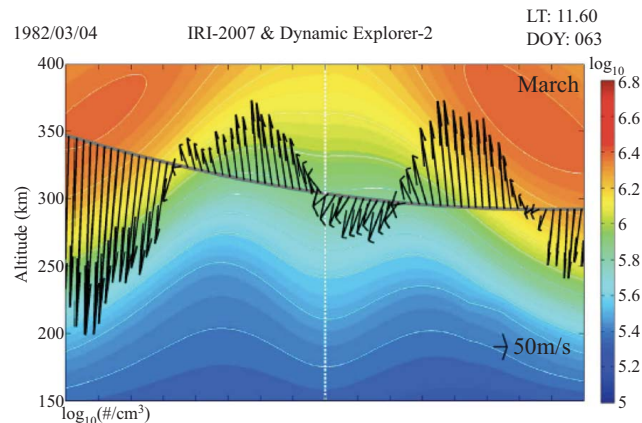
在東北亞、北太平洋、歐洲等地[7, 19], 由於該現象並不僅局限於南極威德海附近, 且同時存在北半球, 基於該現象出現於中緯度夏季夜晚, 我們將其命名為電離層中緯度夏季異常現象 (mid-latitude nighttime anomaly, MSNA)。

由福衛三號提供之三維電離層電漿結構觀測, 我們得以利用理論模式模擬該現象並與福衛三號觀測比較, 後來發現該結構是由中緯度垂直中性風場以及電漿球層傳輸造成電漿堆積而產生[20], 稍候我們也發現熱氣球層本身的風場產生之潮汐效應, 以及波數為1之行星波會同時作用, 使該電漿結構產生向東漂移現象[21]。中緯度夏季異常電漿結構由發現到完整解釋該現象之物理機制與福衛三號全球三維觀測有相當大的關係, 也是福衛三號電離層研究重要貢獻之一。

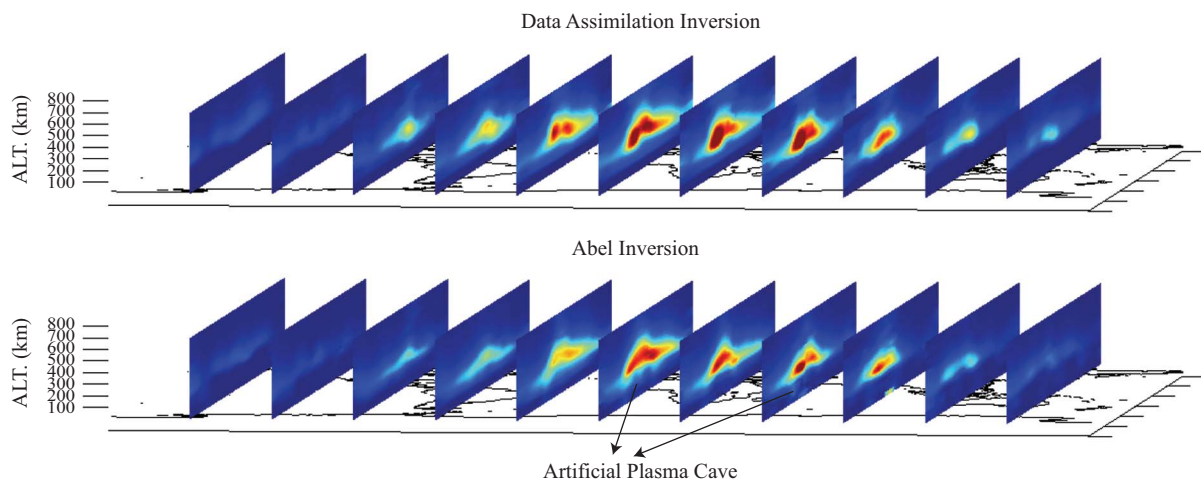
4. 發現低緯度電離層電漿洞 (plasma cave)

福衛三號發射後, 我們由初期觀測資料發現在低緯度電離層赤道異常區南北峰值下方位於高度約100-250公里處有兩個較低電漿密度的區域, 檢視以觀測資料建構之國際參考電離層經驗模式(International Reference Ionosphere, IRI) 也發現有相似之電漿結構(圖五), 此一現象過去未曾被發現, 因此我們將該現象命名為赤道電漿洞(equatorial plasma cave), 並猜測該現象可能與赤道噴泉效應相關。

然而, 我們隨後利用理論模式進行觀測模擬實驗發現, 福衛三號觀測此電漿洞現象可能有很大一部份來自於無線電掩星反演誤差, 由於目前福衛三號觀測將掩星觀測之全電子含量以 Abel 積分法反演成沿高度變化之電子密度分布, 此反演法假設掩星訊號涵蓋之經緯度區域之



圖五 國際電離層參考經驗模式(International Reference Ionosphere, IRI)輸出之電離層電子密度高度隨緯度變化以及 DE-2 衛星觀測之電漿漂移速度 (箭頭)。圖摘自[23]



圖六 比較利用資料同化進行福衛三號電離層掩星反演 (上圖) 與 Abel 反演 (下圖) 之差異

電離層結構為球對稱之均勻電漿分布(spherical symmetry)，與實際情形有相當差距，特別是低緯度赤道異常電漿結構造成沿緯度方向的電漿密度差異，使得赤道異常電漿結構下方較低高度有著較大的反演誤差[22]。

為了證實電漿洞確實存在，我們分析美國 DE-2 衛星之電離層離子漂移速度觀測資料 (圖五箭號觀測)，發現電漿漂移速度在不同緯度的差異與電漿洞結構吻合，極可能是因為電場或中性風場產生的緯度方向電漿漂移速度差而產生該電漿洞結構[23]。雖然此一研究因為福衛三號在 100-200 公里高度無法提供可信賴之觀測反演結果而由其他衛星觀測得到初步的物理機制，但此現象的發現起初源自於福衛三號觀測結果，也算是福衛三號電離層研究貢獻之一。

三、電離層太空天氣預報

在福衛三號規劃期間，由於全球地面 GPS 接收機網的佈建，加上預期福衛三號可以提供海洋上空電離層觀測資料，太空科學家開始思考是否可以將大氣科學家結合大氣觀測資料與理論動力模式進行天氣預報的資料同化(data assimilation)演算法移植到電離層進行太空天氣預報，於是太空科學家開始積極發展全球電離層資料同化模式(global assimilative ionospheric model, GAIM)，系集卡爾曼濾波(ensemble Kalman filter)開始被運用於同化電離層觀測資料至電離層模式，並可成功的以福衛三號觀測進行電離層資料同化模擬[24]。有別於天氣預報模式擁有大量的全球觀測，電離層觀測即使加上福衛

三號觀測仍然遠低於大氣觀測，此外，電離層除了受到中性大氣影響，也受到太陽風與磁層影響，擾動因子較大氣系統複雜，因此發展能夠預測太陽風暴影響之電離層太空預報模式仍然是一大挑戰，福衛三號後續之福衛七號任務將有 12 顆微衛星可接收 GPS、GLONASS 以及 Galileo 衛星資料，提供目前觀測約 3-4 倍觀測量資料，將有助於提升電離層預報能力 [25]。

發展電離層預報模式除了可進行太空天氣預報，也解決了福衛三號掩星反演在低層高度因為球對稱假設產生的誤差。由 2.4 節電漿洞相關討論中，我們知道福衛三號觀測反演在較低高度 (100-200 公里)，因為較高層電離層有較大的電漿密度變化而有較大的誤差，使得反演之電漿密度垂直分布結果無法用來進行相關電離層研究。此一誤差困擾隨著資料同化模式的發展得到有效的解決方案，因為資料同化模式同時同化地面 GPS 接收機資料，並配合理論電離層模式輸出之背景場可以估算較高層電離層電子密度變化，而無須假設電離層電漿密度為球對稱均勻分布，圖六顯示以資料同化模式反演之電漿密度分布 (上圖)，與 Abel 反演結果 (下圖) 比較，可以看到以 Abel 反演在電離層低層因為反演誤差產生的電漿洞 (artificial plasma cave)，在資料同化反演可以有效的去除。同時，Abel 反演在電離層 F 層較為低估的結果也得到修正。

感謝

本文彙整之福衛三號研究成果為團隊成果，主要貢獻來自於中央研究院劉兆漢院士、國家太空中心劉正彥首席科學家、中央大學張起維教授、李奕德博士、林其彥博士候選人、孫楊軼博士候選人、成功大學陳佳宏博士、林佳廷博士生。

參考文獻

- [1] C. H. Lin, W. Wang, M. E. Hagan, C. C. Hsiao, T. J. Immel, M. L. Hsu, J. Y. Liu, L. J. Paxton, T. W. Fang and C. H. Liu (2007), *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L11112, doi:10.1029/2007GL029265 (2007).
- [2] 林建宏，自然科學簡訊 24:1 2012.02[民國 101.02] 頁 18-22, (2012).
- [3] T. J. Immel, E. Sagawa, S. L. England, S. B. Henderson, M. E. Hagan, S. B. Mende, H. U. Frey, C. M. Swenson and L. J. Paxton, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L15108, doi:10.1029/2006GL026161 (2006).
- [4] M. E. Hagan, A. Maute, R. G. Roble, A. D. Richmond, T. J. Immel, and S. L. England, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L20109, doi:10.1029/2007GL030142 (2007).
- [5] J. M. Forbes, X. Zhang, S. Palo, J. Russell, C. J. Mertens, and M. Mlynczak, *J. Geophys. Res.*, **113**, A02310, doi:10.1029/2007JA012737 (2008).
- [6] L. Scherliess, D. C. Thompson and R. W. Schunk, *J. Geophys. Res.*, **113**, A01311, doi:10.1029/2007JA012480 (2008).
- [7] C. H. Lin, C. H. Chen, H. F. Tsai, C. H. Liu, J. Y. Liu and Y. Kakinami, Longitudinal Structure of the Mid- and Low-Latitude Ionosphere Observed by Space-borne GPS Receivers, *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*, Chapter 27, pp. 363-374, IAGA SPECIAL SOPRON BOOK SERIES Volume 2, Springer, doi: 10.1007/978-94-007-0326-1_27 (2011).
- [8] L. C. Chang, C.-H. Lin, J. Yue, J.-Y. Liu and J.-T. Lin, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **118**, 6651, doi:10.1002/jgra.50583 (2013a).
- [9] J. L. Chau, B. G. Fejer and L. P. Goncharenko, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L05101, doi:10.1029/2008GL036785 (2009).
- [10] L. P. Goncharenko, J. L. Chau, H.-L. Liu and A. J. Coster, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L10101, doi:10.1029/2010GL043125 (2010).
- [11] C. H. Lin, J. T. Lin, L. C. Chang, J. Y. Liu, C. H. Chen, W. H. Chen, H. H. Huang and C. H. Liu, *J. Geophys. Res.*, **117**, A06323, doi:10.1029/2011JA017230 (2012).
- [12] J. T. Lin, C. H. Lin, L. C. Chang, H. H. Huang, J. Y. Liu, A. B. Chen, C. H. Chen and C. H. Liu, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L02101, doi:10.1029/2011GL050248 (2012).
- [13] L. P. Goncharenko, A. J. Coster, R. A. Plumb and D. I. V. Domeisen, *Geophys. Res. Lett.*, **39**,

- L08101, doi:10.1029/2012GL051261 (2012).
- [14] L. C. Chang, C.-H. Lin, J.-Y. Liu, N. Balan, J. Yue and J.-T. Lin, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **118**, doi:10.1002/jgra.50268 (2013b).
- [15] W. H. Bellchambers and W. R. Piggott, *Nature*, **188**, 1596 (1958).
- [16] R. Penndorf, *Ant. Res. Ser.*, vol 4, edited by A. H. Waynick, pp1-45, AGU, Washington, D. C (1965).
- [17] I. Horvath and E. A. Essex, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **65**, 693 (2003).
- [18] C. H. Lin, J. Y. Liu, C. Z. Cheng, C. H. Chen, C. H. Liu, W. Wang, A. G. Burns and J. Lei, *J. Geophys. Res.*, **114**, A02312, doi:10.1029/2008JA013455 (2009).
- [19] C. H. Lin, C. H. Liu, J. Y. Liu, C. H. Chen, A. G. Burns and W. Wang, *J. Geophys. Res.*, **115**, A03308, doi:10.1029/2009JA014084 (2010).
- [20] C. H. Chen, J. D. Huba, A. Saito, C. H. Lin and J. Y. Liu, *J. Geophys. Res.*, **116**, A04305, doi:10.1029/2010JA015573 (2011).
- [21] C. H. Chen, C. H. Lin, L. C. Chang, J. D. Huba, J. T. Lin, A. Saito and J. Y. Liu, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **118**, 3836, doi:10.1002/jgra.50340 (2013).
- [22] J. Y. Liu, C. Y. Lin, C. H. Lin, H. F. Tsai, S. C. Solomon, Y. Y. Sun, I. T. Lee, W. S. Schreiner and Y. H. Kuo, *J. Geophys. Res.*, **115**, A07319, doi:10.1029/2009JA015079 (2010).
- [23] I. T. Lee, J. Y. Liu, C. H. Lin, K. I. Oyama, C. Y. Chen and C. H. Chen, *J. Geophys. Res.*, **117**, A11309, doi: 10.1029/2012JA017868 (2012a).
- [24] I. T. Lee, T. Matsuo, A. D. Richmond, J. Y. Liu, W. Wang, C. H. Lin, J. L. Anderson and M. Q. Chen, *J. Geophys. Res.*, **117**, A10318, doi:10.1029/2012JA017700 (2012b).
- [25] I.-T. Lee, H. F. Tsai, J. Y. Liu, C. H. Lin, T. Matsuo and L. C. Chang, *J. Geophys. Res.*, **118**, 6518, doi:10.1002/jgra.50538 (2013).