

2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160019

參展科別 物理與天文學

作品名稱 單低谷型磁暴事件先兆之分析

得獎獎項 一等獎

美國ISEF正選代表

就讀學校 臺北市立第一女子高級中學

指導教師 楊善茜、楊雅惠

作者姓名 劉宇宸、林昕妤

關鍵詞 磁暴、行星際磁場南向分量、太陽風動壓

作者簡介



我們是來自臺北市立第一女子高級中學的劉宇宸和林昕妤。誤打誤撞進入了地球科學組，在研究的道路上跌跌撞撞，轉了很多的彎，如進入桃花源的武陵人，或許不知道最後會到達哪裡，那邊又是怎麼樣的光景，卻向前奔赴。感謝在我們踏入太空天氣領域這個新世界時，盛情邀約與一路支持我們的楊雅惠教授和楊善茜老師；感謝父母給予我們的支援和協助；感謝一路上給予我們作品指教和建議的評審老師們。也謝謝這份研究，和一直一起努力的夥伴。

摘要

磁暴是地球磁場的劇烈擾動現象。由於強烈磁暴可能對人造衛星、地面電力系統的穩定性帶來損害，因此了解磁暴事件的機制十分重要。本研究利用 OMNI 資料庫中的地磁指數與行星際磁場南北向分量、太陽風動壓、太陽風風速、質子密度等物理量觀測資料，分析太陽週期 22 至 24 期間的單低谷型磁暴事件，此類型事件佔總分析期間磁暴事件的近五成。首先磁暴事件數量比例大致隨強度增強而遞減；不過安靜期也有較強烈的事件發生。接著分析各物理量與事件強度的相關性，其中行星際磁場南向分量、太陽風動壓相關係數分別達 0.80 和 0.64，推論可做為磁暴先兆的依據。因此分別建立太陽週期 22、23 及太陽週期 24 之行星際磁場南向分量、太陽風動壓對事件強度的經驗關係式，並據此計算行星際磁場南向分量對應的事件強度門檻值。目前逐步比對太陽週期 25 的磁暴事件，推論以太陽週期 24 的經驗式得出的門檻值，可能較適用目前太陽週期 25 發生的磁暴事件。

Abstract

A geomagnetic storm is a disturbance of Earth's magnetic fields. A severe storm can lead to the temporary or permanent loss of satellites and also the damage of ground power systems. It is thus important to figure out the interplanetary causes of geomagnetic storms. In this study, we use the geomagnetic index Dst and the solar wind and interplanetary magnetic field (IMF) quantities provided by OMNI database to analyze the geomagnetic storms during solar cycles 22 to 24. The magnitude of each storm event is defined by the minimum of Dst index. According to the selection criteria of isolated storm we made here, the cases with multiple local minima in Dst profiles are excluded, which may result in the less number of severe storms in our database. We find that the severe events can even occur during solar minimum. The correlation coefficient between southward IMF Bz and storm magnitude is 0.80, and the correlation is 0.64 for solar wind dynamic pressure P and storm magnitude. We further estimate the empirical formula of storm-time Dst minimum in terms of solar wind parameters. It is shown that the empirical relation and the Bz threshold for storm occurrence derived from cycle 24 is better fitted the storm events in cycle 25 than those from cycles 22 and 23.

壹、前言

一、研究動機

高一上學期老師帶我們觀測太陽黑子，然而卻看不到任何一個太陽黑子，經由查詢 space weather 網站 (<https://www.spaceweather.com/>) 發現當時是安靜期。在學校學習到太陽黑

子的出現和週期變化會對太陽風產生影響，進而影響到地球磁層，於是我們便開始好奇太陽黑子會對我們生活的環境產生什麼樣的影響？有可能針對太空劇烈天氣的發布預警嗎？

進一步鑽研〈A comparison of the IMF structure and the magnetic field in the magnetosheath under the radial IMF conditions〉（Pi, Shue, Park, Chao, Yang, Lin, 2016）之後，我們練習了使用 OMNI、CDAWeb 來進行資料分析的方法，並且更了解磁暴（geomagnetic storm）與太陽風（solar wind），希望透過分析太陽風相關之物理量找出可能預測磁暴之依據。

我們希望利用 OMNI 資料庫中的太陽風各物理量資料，進行相關性分析，找出與磁暴事件最相關之物理量，以及分析太陽活躍期和安靜期的磁暴情形，了解太陽活動如何影響磁暴事件的發生。

二、研究目的

（一）探討太陽週期（solar cycle）22 至 24 期間活躍與安靜期磁暴事件強度分布

太陽活躍期、安靜期，太陽風情況有所不同，對地球可能造成不同程度的影響。因此希望藉由分析活躍及安靜期間磁暴事件強度分布，了解其中的差異。

（二）分析太陽週期 22 至 24 不同物理量對磁暴事件之相關性

太陽風的物理性質可能影響磁暴之發生，如行星際磁場南向分量（Bz）、太陽風風速（flow speed）、質子密度（proton density）、太陽風動壓（dynamic pressure）等，因此希望藉由分析相關性，探討何種物理量與磁暴最為相關，推論是否能以上述物理量作為磁暴先兆的警示依據。

（三）提出單低谷型磁暴事件強度的經驗關係式

根據太陽風及行星際磁場物理量的相關性分析結果，結合相關性佳的物理量，計算磁暴事件強度與物理量的經驗關係式。

貳、研究過程或方法及進行步驟

一、研究設備及器材

（一）CDAweb（Coordinated Data Analysis Web）

CDAweb 集合來自於不同人造衛星的觀測資料，如 GOES（Geostationary Operational Environmental Satellite Program）、Interball、SOHO（Solar and Heliospheric Observatory）等。本研究利用 CDAweb，取得 OMNI 資料庫的觀測數據資料及其隨時間的變化圖。

（二）OMNI 資料庫（OMNIweb）

1970 年代，National Space Science Data Center (NSSDC) 創立了 OMNI 資料庫，集合來自不同人造衛星觀測太陽風的資料，如 ACE (Advanced Composition Explorer)、IMP-8 (Interplanetary Monitoring Platform)、ISEE-3 (Interplanetary Sun Earth Explorer) 等。此資料庫的數據已推移至船震波 (bow shock) 日下點處；船震波與地球相對位置如圖一所示，在一般太陽風情形下，船震波日下點約與地心相距 15 地球半徑遠。船震波位於地球磁層之外，因此觀測資料顯示該處太陽風的性質。此外，OMNI 資料庫也包含一些地磁活動指數，如於中低緯度測站測量地磁變化計算出的 Dst (Disturbance storm-time)、SYM 指數等。

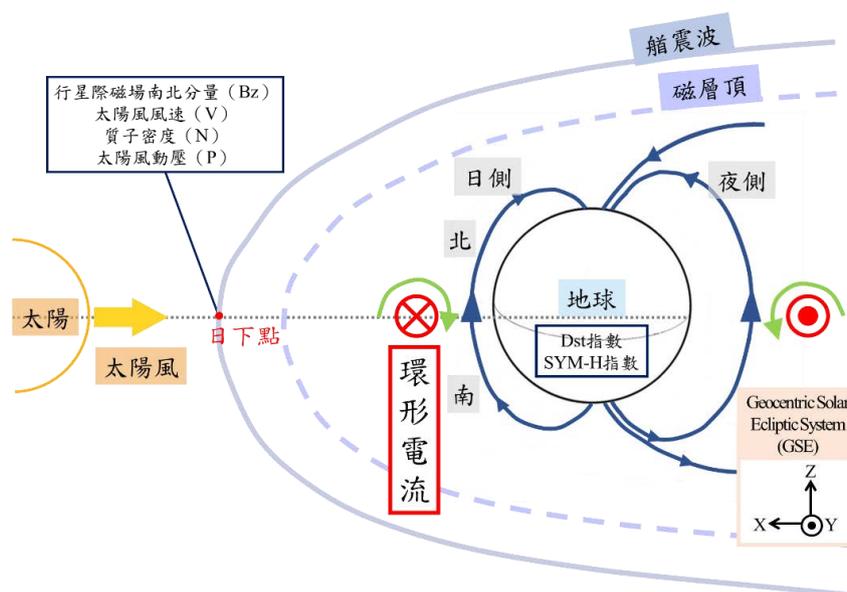
本研究利用資料庫中時間解析度為 1 分鐘的觀測資料，包含行星際磁場南北分量、太陽風風速、質子密度、太陽風動壓；以及地磁指數資料，包含時間解析度為 1 分鐘的 SYM-H 指數、時間解析度為 1 小時的 Dst 指數，進行對磁暴事件與太陽風各物理量的相關性探討。

(三) SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations)

SILSO 是比利時皇家天文台的部門 SIDC (Solar Influences Data Analysis Center) 中的計畫，以保存及傳播太陽黑子數的歷史資料為目標。為了確保現今觀測資料和過去兩百年以來的太陽黑子資料仍能夠相互比較，採用和過去相同的觀測方法，依舊是以望遠鏡觀察計算每日的太陽黑子數 (SILSO, 2020)。本研究利用其中 Daily total sunspot number 的資料，進行黑子數對磁暴事件影響的探討。

(四) SDO (Solar Dynamics Observatory)

SDO 是 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 的 Living With a Star (LWS) 計畫執行的第一個任務，旨在透過拍攝不同波段的太陽大氣影像，了解太陽活動對星際空間及近地球環境造成的影響。



圖一：環形電流與地表水平磁場關係示意圖，太陽於此圖左側，圖中藍色箭頭表示地表磁場方向，紅色部分表示環形電流在夜側為出紙面方向、日側為入紙面方向，綠色箭頭則表示環形電流產生的磁場方向（圖片資料來源：研究者自行繪製，未按實際比例）

二、物理量意義說明

（一）行星際磁場（interplanetary magnetic field, IMF。）

行星際磁場源自太陽磁場：當太陽風離開太陽表面時，會將太陽磁場帶入行星際空間中，形成行星際磁場。太陽風大致以遠離太陽的徑向方向移動，加上太陽自轉，使行星際磁場呈現螺線的結構；一般在地球軌道附近，行星際磁場方向與日地連線的夾角約 45 度。但當太陽風風速不同時，行星際磁場的指向將會隨之改變（畢可為，2016）。

在本研究中，以 GSE 座標系統（Geocentric Solar Ecliptic Coordinate）表示行星際磁場的各分量。其中 X 軸為日地連線，往太陽的方向為正；Z 軸垂直於地球公轉軌道平面，向北為正，向南為負；Y 軸則由右手定則定義出，指向昏側為正，晨側為負。本研究則主要著重於行星際磁場南北分量，以 B_z 表示。

（二）太陽風動壓（dynamic pressure, P ）

太陽風動壓的數據，可利用以下公式計算而得：

$$\text{dynamic pressure} = m \times N \times V^2 \approx 2 \times 10^{-6} \times N \times V^2 \quad (\text{式一})$$

其中太陽風動壓單位為 nPa； m 指質子質量，約為 1.67×10^{-27} kg； N 指質子密度，單位為 1/cc； V 為質子速度，單位為 km/s。

太陽風動壓代表在該位置因太陽風流動所受的壓力大小。太陽風動壓的變化，會對磁層和太陽風之間能量轉換造成影響（Adebesin, O. B., Ikubanni, S. O., & Kayode, J. S., 2012）。此外，太陽風動壓的變動是磁層頂位置改變的因素之一；當磁層頂位置往地表移動時，電漿層頂及環形電流的位置也將隨之內移，同樣也會使地球磁場的下降，造成磁暴。

（三）太陽風風速（flow speed, V ）

近地處量測的太陽風風速平均約為 400 km/s，但太陽表面各區域環境條件差異，使吹送出的太陽風風速有所不同；而根據太陽風風速的大小，可將太陽風分為低速太陽風（300 km/s~400 km/s）及高速太陽風（600 km/s~1000 km/s）。

(四) 太陽風質子密度 (proton density, N)

質子密度表示單位體積中有多少個質子，屬於數量密度 (number density)。太陽風中的帶正電粒子主要由質子及氦離子組成，而質子佔了多數。質子密度的變化幅度大小，同樣取決於太陽表面噴發出太陽風位置的環境條件，一般在近地處約 3~15 1/cc 之間。

(五) Dst 指數 (Disturbance storm-time, Dst index)

地球磁層中，有電流環繞於地球中低緯度上空，稱為環形電流 (ring current)。環形電流的位置約莫在赤道上空高度 6400 到 38000 公里，大致位於電漿層頂 (plasmopause)。電漿層內外電漿密度差異，及范愛倫輻射帶 (Van Allen radiation belt) 中高能帶電粒子的集體運動，是電漿層頂出現環形電流的主要原因。從地球北方俯視觀察，環形電流的方向是順時鐘，即圖一所示，由夜側出紙面、日側入紙面。環形電流產生的磁場，為影響地球磁場強度的變因之一。由於環形電流產生的磁場方向，在地表附近為南向，與地球磁場方向相反，因此當環形電流增持續強，導致其磁場也隨之增強時，地磁強度因而劇烈下降，進而產生磁暴。

Dst 指數為觀測地球磁場水平分量變化的指數，其觀測時間解析度為 1 小時 1 筆資料，單位為 nanoteslas (nT)。藉由 Dst 指數觀察地磁水平分量變化量，可以進一步估算的環形電流的變化量。由於 Dst 指數定北向為正，因此當磁暴事件發生期間，環形電流增強增強，使地表北向磁場發生變化時，Dst 指數會呈現負值。除此之外，Dst 指數也可用於討論磁暴事件的不同階段與磁暴規模大小，因此本研究用 Dst 指數作為初步判斷磁暴事件，以及判定磁暴事件強度的標準。

(六) SYM 指數 (Symmetric, SYM index)

SYM 指數用於觀測垂直及平行於地磁偶極軸 (Dipole Axis) 的分量擾動。其中，地磁水平分量擾動，即為 SYM-H 指數觀測的對象，其觀測時間解析度為 1 分鐘 1 筆資料，單位為 nT。根據 Wanliss, J. A. 和 Showalter, K. M. 在 2006 年的研究，Dst 指數和 SYM-H 指數主要的差異為時間解析度的不同，其餘差異不大，因此可以將 SYM-H 指數視為 Dst 指數的高時間解析度替代版本，且 SYM-H 能呈現更細節、複雜的地磁擾動。因此本研究以 SYM-H 指數，作為進階判斷並分析磁暴事件的參考依據。

三、研究背景說明

太陽風狀態一般可用行星際磁場和電漿參數來描述，本研究主要著重於行星際磁場南北分量，而電漿參數則採用太陽風質子密度、太陽風風速及太陽風動壓。研究中的太陽風電漿及磁場物理量資料來自 OMNI 資料庫。

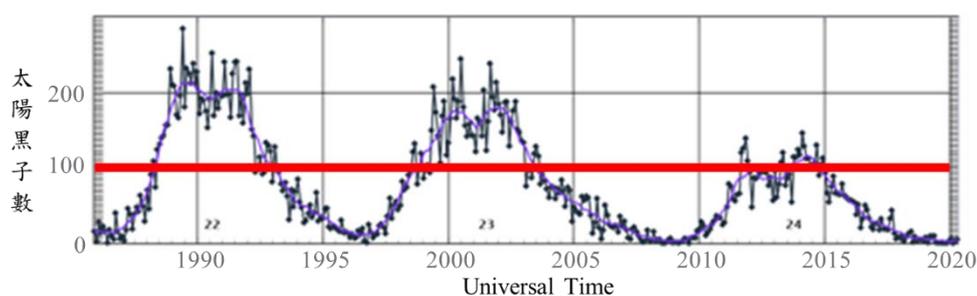
當接近地球附近的太陽風，其行星際磁場帶有南向分量、使船震波處測得太陽風物理量出現劇烈的擾動時，行星際磁場會於地球磁層頂和地球北向的磁場產生交互作用。接著太陽風的粒子及能量，將改變地球磁層內部磁場型態、電流系統，其中造成環形電流強度增強。當環形電流強度增強之後，其誘發的南向磁場也將隨之增強，地球的北向磁場因而產生劇烈變化，Dst、SYM-H 指數等地磁指數明顯下降，顯示磁暴事件的發生。

磁暴是指地表中低緯度地磁強度劇烈變化的現象；透過觀測地磁水平分量的時序變化，如 Dst、SYM-H 指數等，可判斷磁暴的發生及強度。

四、太陽黑子數目分類

由於要探討太陽活躍、安靜期之間的差異，因此採用磁暴事件當日的太陽黑子數，判斷太陽活躍程度。為能以相同標準分析太陽週期 22（1986 年 9 月至 1989 年 11 月）、23（1996 年 8 月至 2001 年 11 月）、24（2008 年 12 月至 2019 年 11 月），本研究參考圖二太陽週期 22 至 24 太陽黑子隨時間的變化圖，訂定區別活躍期與安靜的標準。如圖二中紅線所示，以黑子數大於 100 為分界，可區別各週期黑子數相對較多的時期；以黑子數小於 50 為分界，可區別各週期黑子數相對較少的時期，因此本研究定活躍期的標準為磁暴事件當日黑子數大於 100，安靜期則為磁暴事件當日黑子數小於 50。

根據此標準，太陽週期 22 安靜期共有 1277 日，平均當日黑子數為 20 個；活躍期有 1659 日，平均當日黑子數為 186 個。太陽週期 23 安靜期共有 1932 日，平均當日黑子數為 17 個；活躍期有 1640 日，平均當日黑子數為 165 個；太陽週期 24 安靜期共有 2318 日，平均當日黑子數為 15 個；活躍期有 696 日，平均當日黑子數為 130 個。



圖二：太陽週期與太陽黑子數（圖片資料來源：Space Weather Prediction Center）

五、事件挑選

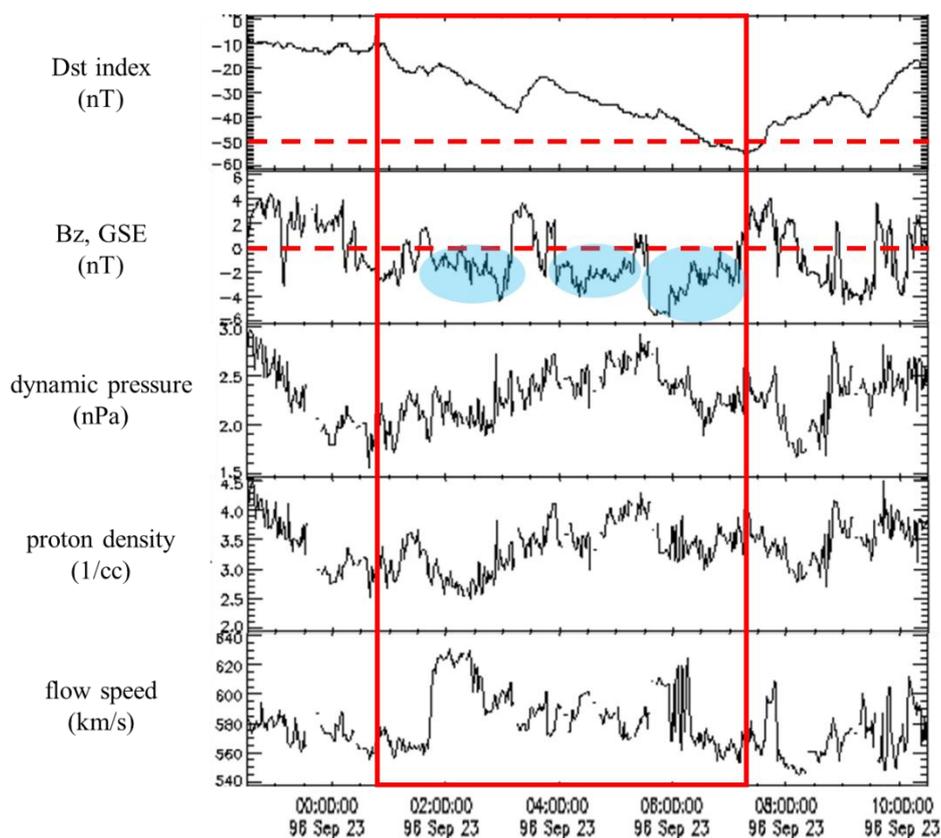
磁暴指地球磁場的劇烈變動，通常以中低緯度測得的地磁南北分量強度變化，判斷觀察事件發生。Rathore 等人在 2011 年的論文〈A Correlative Study of Geomagnetic Storms Associated with Solar Wind and IMF Features During Solar Cycle 23〉中定義磁暴事件為 Dst 小於 -50 nT，本研究沿用作為磁暴事件之篩選標準，找出發生磁暴事件的日期。然後根據本研究訂定的活躍

期、安靜期標準，依磁暴當日太陽黑子數目將事件區分為兩類，為黑子數大於 100 和小於 50 的事件。

自 CDAweb 資料庫下載磁暴事件各物理量及 SYM-H 指數隨時間變化圖，首先察看各物理量的觀測資料是否缺失，本研究僅挑選觀測資料完整可供分析的磁暴事件。接著為篩選出典型的磁暴事件以進行後續的相關性分析，本研究利用 SYM-H 指數，篩選僅出現一次低谷值的磁暴事件，因此之後的分析只將此類事件作為分析對象。最後本研究定義如圖三中的紅框為事件的歷時長度，最後針對磁暴事件歷時期間各物理量進行相關性分析。

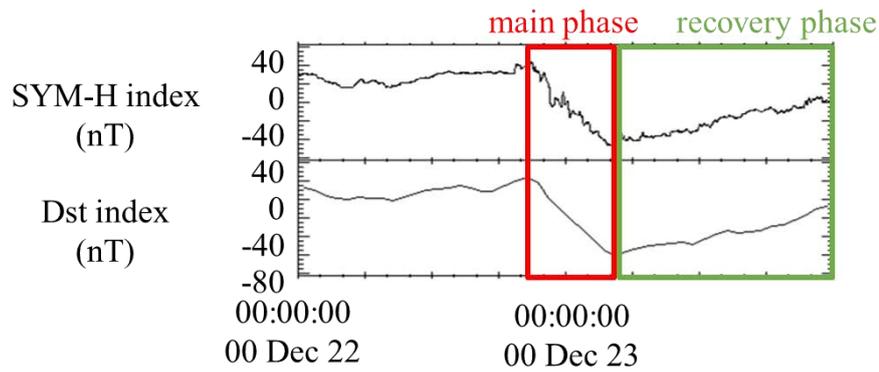
如圖四 (a) 即為單低谷型磁暴事件，SYM-H 指數和 Dst 指數皆僅出現一次明顯下降的變化。圖四 (b) 則為多低谷值磁暴事件，SYM-H 指數和 Dst 指數皆明顯下降了數次；由於難以判斷此類事件的歷時，以及較難以單一物理量極值判定太陽風物理量對地球磁層的影響，因此本研究以單低谷型磁暴事件作為後續分析對象。

本研究篩選出太陽週期 22 安靜期 15 起事件，活躍期 19 起事件；太陽週期 23 安靜期共 45 起磁暴事件，活躍期 102 起事件；太陽週期 24 安靜期 59 起磁暴事件，活躍期 35 起事件。

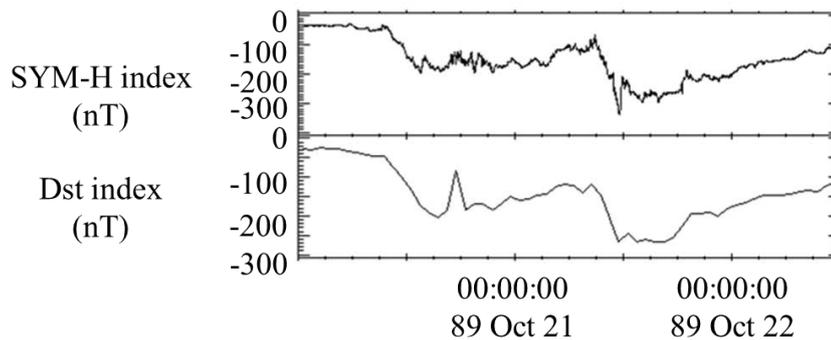


圖三：1996 / 09 / 23 磁暴事件（單低谷型事件）。由上到下為 SYM-H、行星際磁場南北分量、太陽風動壓、質子密度、太陽風風速隨時間的變化圖。圖中紅框標示了事件進行的歷時，虛線則分別表示 SYM-H 指數等於 -50 及行星際磁場南北分量等於 0 的分界線。（圖片

資料來源：CDA web）



(a) 2000 / 12 / 22 ~ 23 磁暴事件 (單低谷型事件)



(b) 1989 / 10 / 20 ~ 22 磁暴事件 (非單低谷型事件)

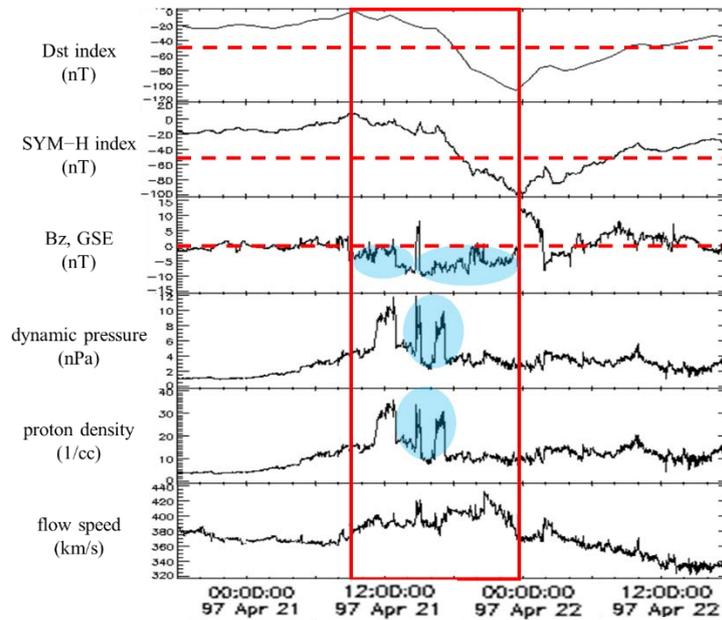
圖四：磁暴事件的各相位與地磁變化。圖片上半為 SYM-H 指數隨時間變化圖，下半為 Dst 指數隨時間變化圖。(圖片資料來源：CDA web)

六、物理量分析

在確認磁暴事件期間觀測資料的完整後，利用 CDA web 繪製 SYM-H、行星際磁場南北分量、太陽風動壓、質子密度、太陽風風速隨時間變化圖。接著以 SYM-H 的變化趨勢，判斷事件進行的歷時，並如圖三、五中的紅框標示。本研究以 SYM-H 指數出現明顯下降趨勢作為事件進行的開始，以 SYM-H 指數達到最小值作為事件歷時的結束。基於本研究欲探討磁暴事件的先兆，因此未將 SYM-H 從最小值恢復平時大小的過程，框入事件歷時的範圍。

而後觀察在紅框標示的時間範圍中，行星際磁場是否持續南向，藉此判斷行星際磁場的南北分量是否為影響事件發展的因素，並將持續南向的時段以藍圈標示。同時觀察在此時間範圍中，動壓或質子密度是否出現和 SYM-H 類似的變化趨勢，藉此判斷動壓、質子密度是否出現能對應事件發展的變化，並將變化趨勢和 SYM-H 相同處以藍圈標示。

如圖五所示，以 1997 年 4 月 21 日的磁暴事件為例，SYM-H 自 21 日 9 時開始下降，22 日 0 時達最小值。在此期間行星際磁場南北分量除了於 21 日 14 時短暫轉為北向之外，皆持續維持南向，因此以藍圈標示出行星際磁場南北分量為南向的時段；21 日 15 時及 21 日 17 時，SYM-H 出現兩次上升，大約同時動壓和質子密度也出現類似劇烈上升的趨勢，因此以藍圈標示其出現相同趨勢的時段。



圖五：1997/04/21 磁暴事件。由上到下為 Dst、SYM-H、行星際磁場南北分量、太陽風動壓、質子密度、太陽風風速隨時間的變化圖。圖中紅框標示了事件進行的歷時，虛線則分別表示 SYM-H 指數等於 -50 及行星際磁場南北分量等於 0 的分界線（圖片資料來源：CDA web）

七、物理量相關性分析

磁暴與太陽風情形的劇烈擾動關聯密切（Rathore et al., 2011）；本研究針對物理量進行分析時，亦想呈現該起事件物理量的強烈程度對磁暴事件強度的影響。計算事件期間物理量的平均值，可能較無法顯現物理量的劇烈擾動。因此本研究採用按研究需求所挑出之磁暴事件期間各物理量的極值，作為該起事件物理量劇烈程度的代表，進行後續分析。涉及的極值物理量包括行星際磁場南向分量最大值、質子密度最大值、太陽風風速最大值、太陽風動壓最大值。本研究將其各自與 Dst 最小值進行相關係數計算，並繪製散佈圖，有助視覺判斷。

八、磁暴事件強度迴歸分析

Khavarova 在 2007 年的研究指出，觀測太陽風與行星際磁場的變化對磁暴預測相當重要，並採用關係式交代太陽風物理量彼此關聯，結合行星際磁場南北分量、質子密度提出經驗關係式如式二。其中 dT 為質子密度和行星際磁場南北向分量出現極值的時間差。

$$Dst = 6.5(Bz - \sqrt{N dT}) - 4.5 \quad (\text{式二})$$

本研究最初參考 Khavarova 的研究方法，得出結合行星際磁場南向分量極值與太陽風動壓極值的經驗關係式。又考量結合不同太陽風物理量後迴歸方程式單位的一致性，故本研究之後採用不同的方式進行分析。

根據物理量相關性分析的結果，找出與磁暴事件期間 Dst 最小值相關性較高的太陽風物理量 x_1 、 x_2 。由於各太陽風物理量、地磁指數的單位皆有不同，本研究分別將各項物理量取對數值，以解決方程式中各項參數的單位差異。將太陽風物理量極值、Dst 最小值取對數後，

接著計算物理量對數值對 Dst 最小值對數值的迴歸方程式，得出形式如式三的關係式。其中 a、b 為 $\log x_1$ 、 $\log x_2$ 的係數，k 則為方程式的截距。

$$\log Dst = a \log x_1 + b \log x_2 + k \quad (\text{式三})$$

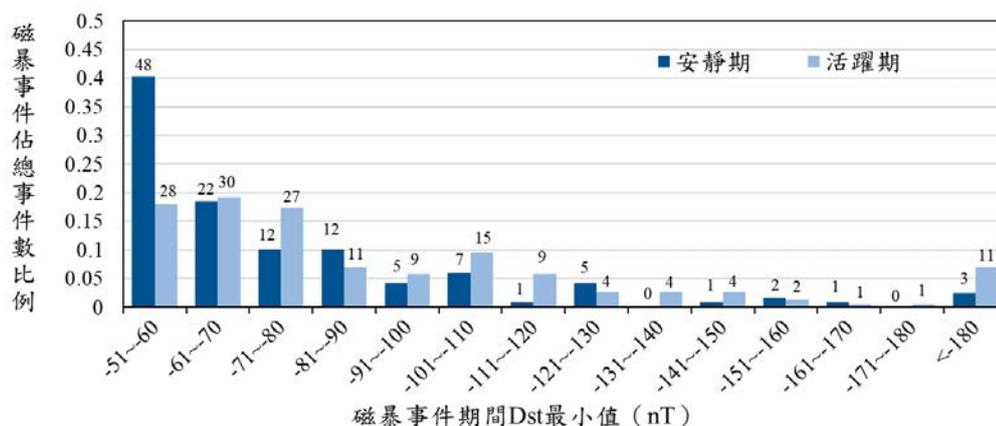
本研究藉由迴歸方程式的判定係數 (R^2)，檢驗方程式的適用情形。同時計算迴歸方程式的殘差 (實際 Dst 對數值與方程式預測的數值之差)，繪製殘差圖，分別 $\log x_1$ 、 $\log x_2$ 為橫軸，式三與實際 Dst 對數值的殘差為縱軸，觀察殘差圖分布的情形，進一步檢驗迴歸方程式。

參、研究結果與討論

一、太陽活躍、安靜期間不同磁暴事件強度的比例

為探討太陽活躍與否是否影響磁暴事件的強度，本研究分析太陽週期 22 至 24 的磁暴事件，以事件當日黑子數區分太陽的活躍與安靜期，並以每起磁暴事件期間 Dst 最小值代表該起磁暴事件強烈程度，探討不同強度磁暴事件的分布情形。兩者分析的結果如圖六所示。圖五橫軸表示磁暴事件不同的強烈程度，每 10 nT 為一個區間，縱軸則分別計算發生於活躍、安靜期的事件數佔該類磁暴事件總數的比例。

以下一共分析了太陽週期 22 至 24 活躍期事件共 156 起，安靜期事件共 119 起。研究發現不論太陽活躍與否，Dst 指數介於 -50 到 -120 nT 的事件皆占約八成。而隨事件強度增強，事件數所佔比例漸漸遞減；強磁暴事件數少，弱磁暴事件數多。安靜期除 -51 至 -60 nT 的弱磁暴事件數較多之外，活躍期各強度磁暴事件數目較多。除了活躍期有較強的事件發生，安靜期也出現強烈磁暴事件，不過其所占比例仍較活躍期低。



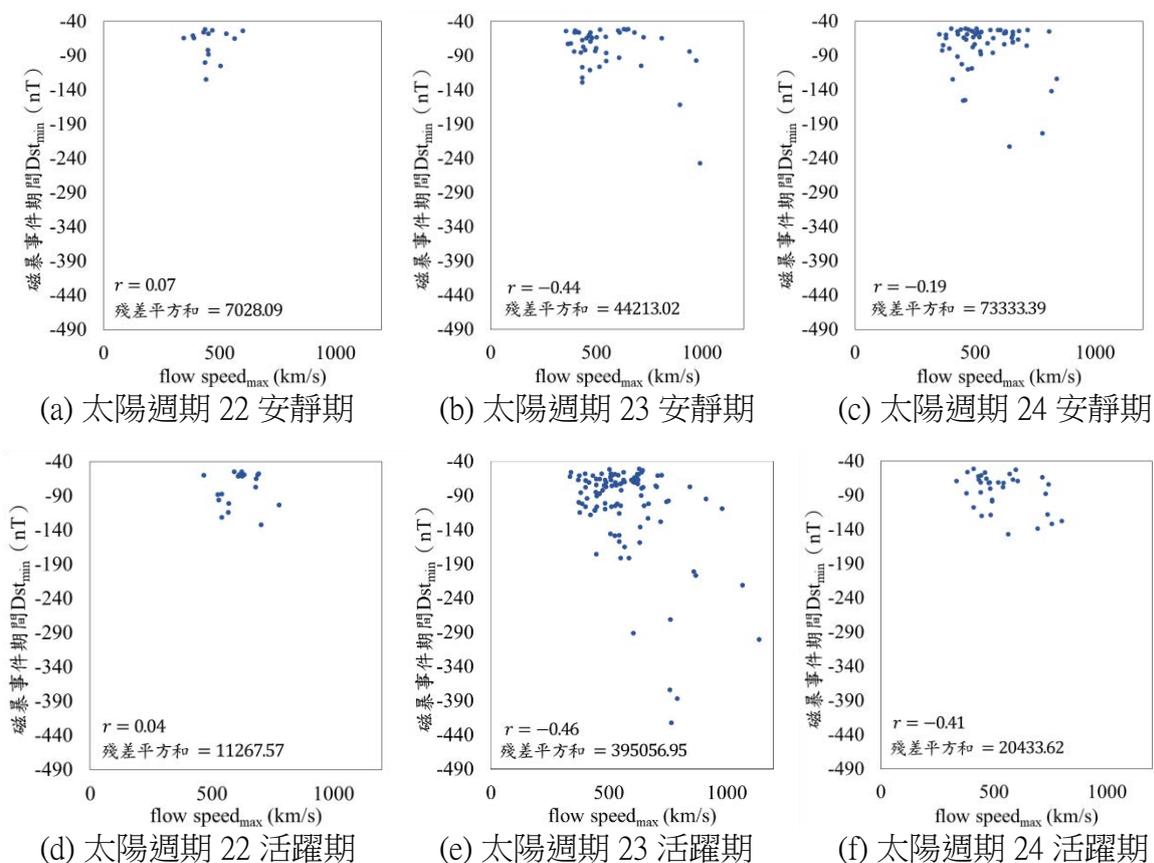
圖六：太陽週期 22 至 24 活躍、安靜期磁暴事件期間 Dst 最小值佔總事件比例圖，長條上方數字表示實際發生的磁暴事件數 (圖片資料來源：研究者自行繪製)

二、物理量相關性分析

(一) Dst 對行星際磁場南向分量相關性

如圖七所示，行星際磁場南向分量與磁暴強度的相關性呈現正相關，在太陽週期 22 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 0.59，太陽週期 22 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 0.48，太陽週期 23 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 0.79，太陽週期 23 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 0.80，太陽週期 24 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 0.70，太陽週期 24 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 0.47。

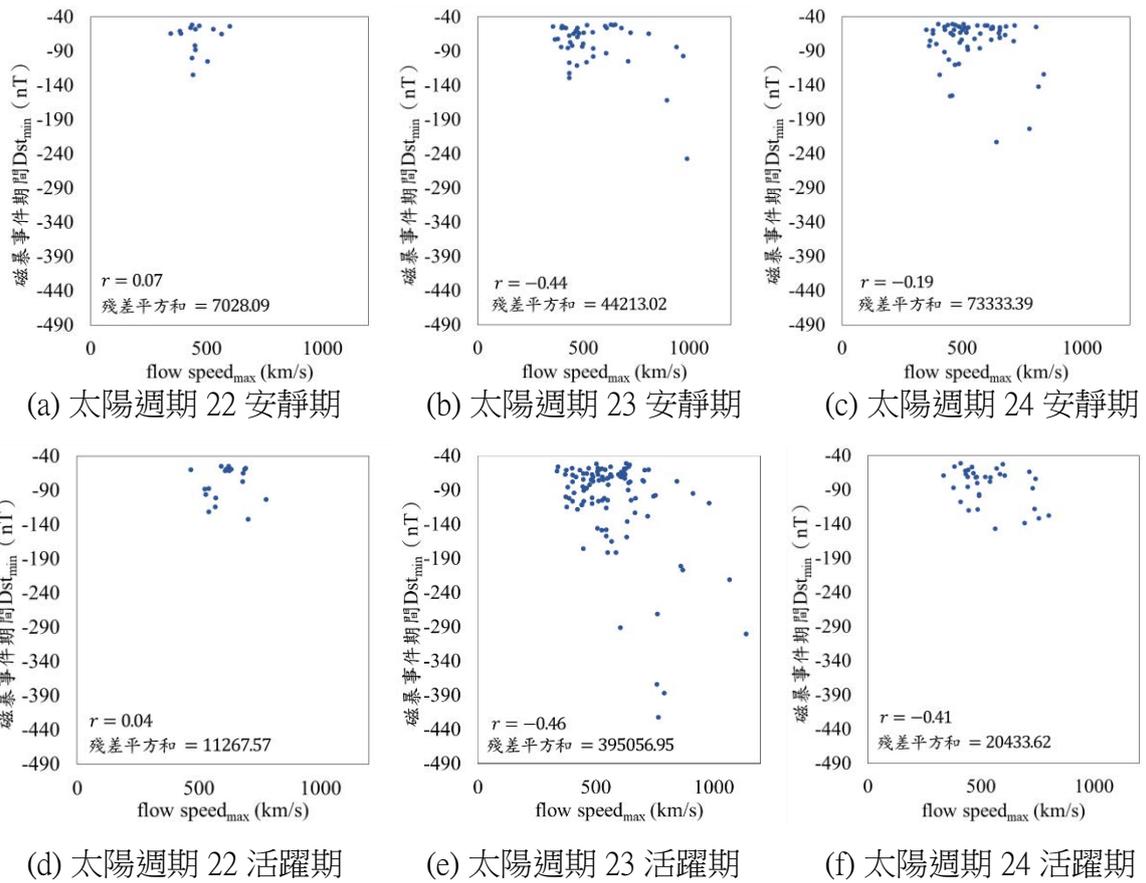
而進一步以迴歸分析檢驗太陽週期 23 安靜期及活躍期，發現沒有顯著差異，未來還會再更進一步探究。



圖七：a ~ f 為各太陽週期安靜期及活躍期 Dst 對行星際磁場南向分量散佈圖（圖片資料來源：研究者自行繪製）

(二) Dst 對太陽風風速相關性

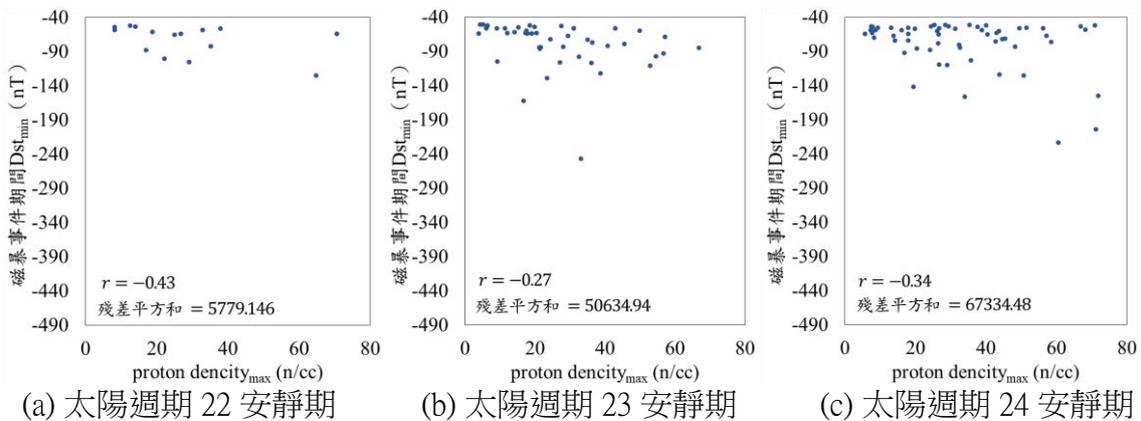
如圖八所示，太陽風風速在太陽週期 22 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 0.07，太陽週期 22 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 0.04，太陽週期 23 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 -0.44，太陽週期 23 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 -0.46，太陽週期 24 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 -0.19，太陽週期 24 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 -0.41。

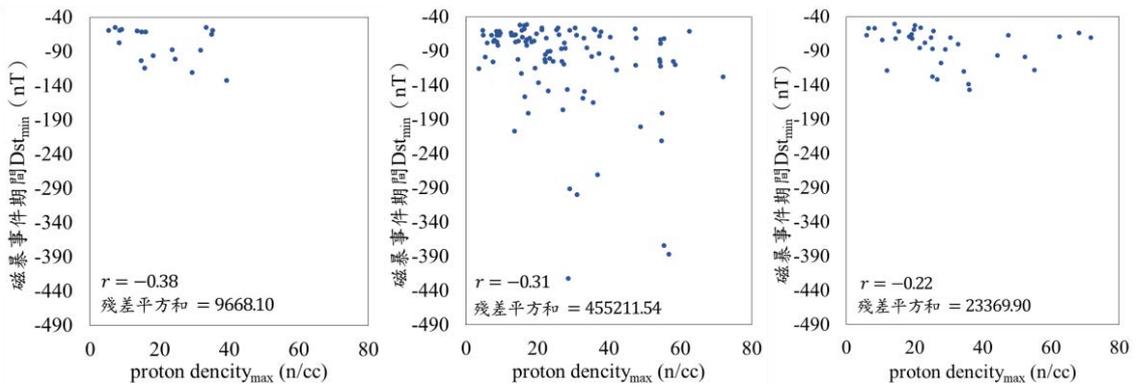


圖八：a ~ f 為各太陽週期安靜期及活躍期 Dst 對太陽風風速散佈圖（圖片資料來源：研究者自行繪製）

（三）Dst 對質子密度相關性

如圖九所示，質子密度在太陽週期 22 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 -0.43，太陽週期 22 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 -0.38，太陽週期 23 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 -0.27，太陽週期 23 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 -0.31，太陽週期 24 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 -0.34，太陽週期 24 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 -0.22。





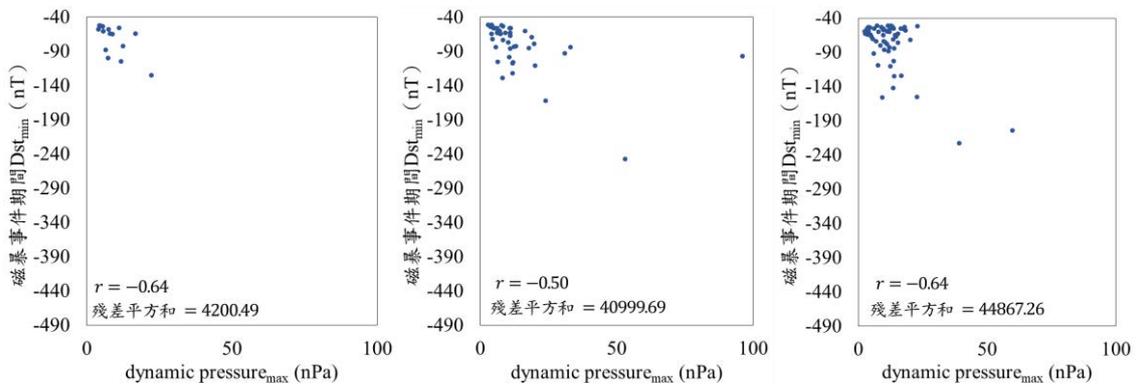
(d) 太陽週期 22 活躍期 (e) 太陽週期 23 活躍期 (f) 太陽週期 24 活躍期

圖九：a ~ f 為各太陽週期安靜期及活躍期 Dst 對質子密度散佈圖（圖片資料來源：研究者自行繪製）

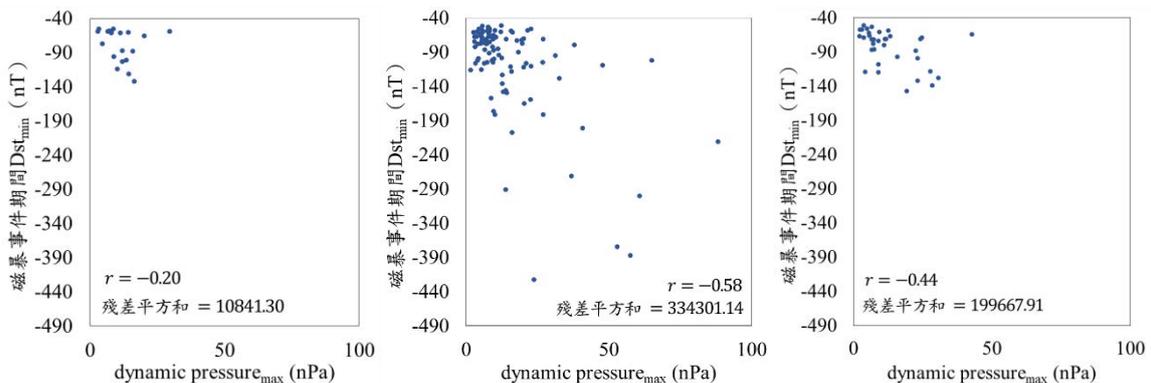
(四) Dst 對太陽風動壓相關性

如圖十所示，太陽風動壓在太陽週期 22 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 -0.64，太陽週期 22 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 -0.20，太陽週期 23 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 -0.50，太陽週期 23 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 -0.58，太陽週期 24 黑子數小於 50 時相關係數 r 為 -0.64，太陽週期 24 黑子數大於 100 時相關係數 r 為 -0.44。

而進一步以迴歸分析檢驗太陽週期 22 及 24 安靜期，發現沒有顯著差異，未來還會再更進一步探究。



(a) 太陽週期 22 安靜期 (b) 太陽週期 23 安靜期 (c) 太陽週期 24 安靜期



(d) 太陽週期 22 活躍期 (e) 太陽週期 23 活躍期 (f) 太陽週期 24 活躍期

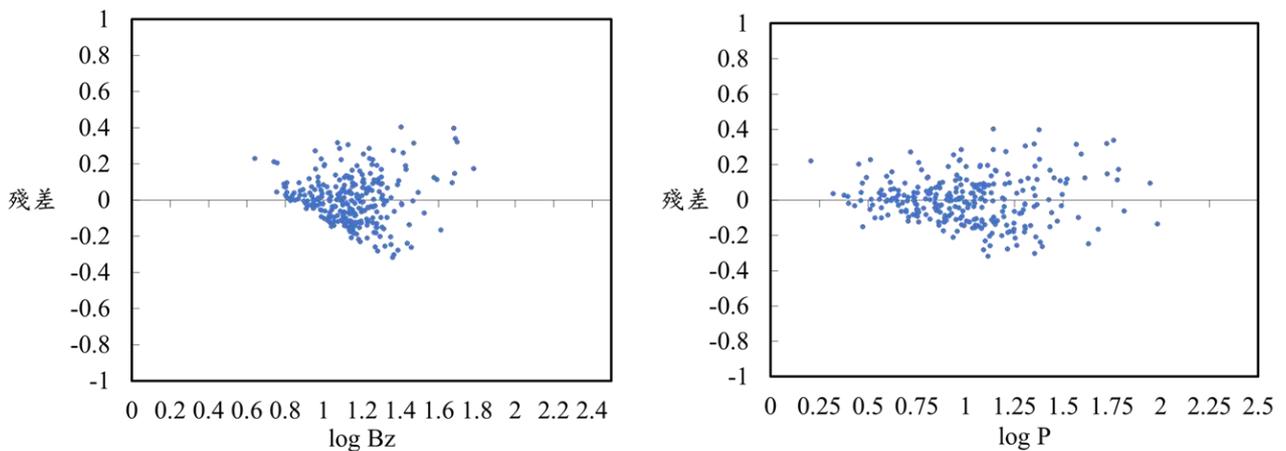
圖十：a ~ f 為各太陽週期安靜期及活躍期 Dst 對太陽風動壓散佈圖（圖片資料來源：研究者自行繪製）

三、磁暴事件強度迴歸分析

前述物理量相關性分析結果中，行星際磁場南向分量、太陽風動壓對磁暴事件強度的相關性較高，因此本研究採用此兩太陽風物理量的對數值，進行迴歸分析，得到的迴歸式如式四所示。式三中的 x_1 為行星際磁場南向分量， x_2 為太陽風動壓。在迴歸方程式中， $\log Bz$ 項係數大於 $\log P$ 項係數，推論行星際磁場南向分量對磁暴事件期間 Dst 最小值的影響程度，較太陽風動壓大。

$$\log Dst = 0.565 \log x_1 + 0.045 \log x_2 + 1.125 \quad (\text{式四})$$

為檢測方程式的適用性，將式四所求出的 Dst 預測數值，對與實際 Dst 最小值進行迴歸分析， R^2 為 0.435。圖十一是迴歸方程式的殘差分布圖，橫軸分別為行星際磁場南向分量對數值、太陽風動壓對數值的對數值，縱軸為迴歸方程式的殘差。大致而言，行星際磁場南向分量對數值變大時，殘差也隨之增加；而以太陽風動壓對數值來看，殘差的分布則為隨機的分佈。



圖十一：log Bz（左）、log P（右）對迴歸方程式的殘差分布圖（圖片資料來源：研究者自行繪製）

四、結果討論

（一）磁暴事件篩選

本研究為確保以一致的標準分析磁暴事件，因此在篩選事件時，僅篩選單一低谷值進行分析，而未納入多低谷值或較為複雜事件。

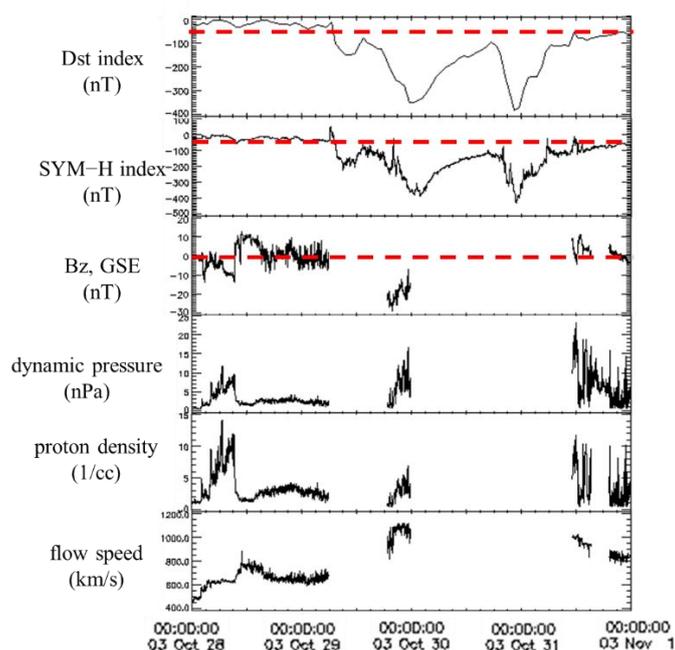
整體而言，太陽週期 22 至 24 共有 564 起磁暴事件。其中單低谷型事件為 316 起，約佔所有磁暴事件 56.03 %；但僅其中 275 起事件資料完整較為完整，因此本研究以此 275 起事件作為分析對象，約佔所有磁暴事件的 48.76 %。

太陽週期 22 活躍期共有 143 起磁暴事件，其中 94 起事件較為複雜，單低谷型磁暴事件為 49 起，約佔 34.27 %；但其中 30 起單低谷型磁暴事件期間物理量資料缺失，本研究最終以 19 起事件作為分析對象。其安靜期則共有 79 起事件，其中 53 起事件較為複雜，單低谷磁暴事件有 26 起，約佔 32.91 %；又 11 起單低谷型磁暴事件期間物理量資料缺失，因此本研究最終以 15 起事件進行後續分析。

太陽週期 23 活躍期共有 159 起磁暴事件，其中 57 起事件較為複雜，單低谷型磁暴事件則有 102 起，約佔 64.15 %；其安靜期則共有 74 起事件，其中 29 起事件較為複雜，單低谷型磁暴事件為 45 起，約佔 60.81 %。

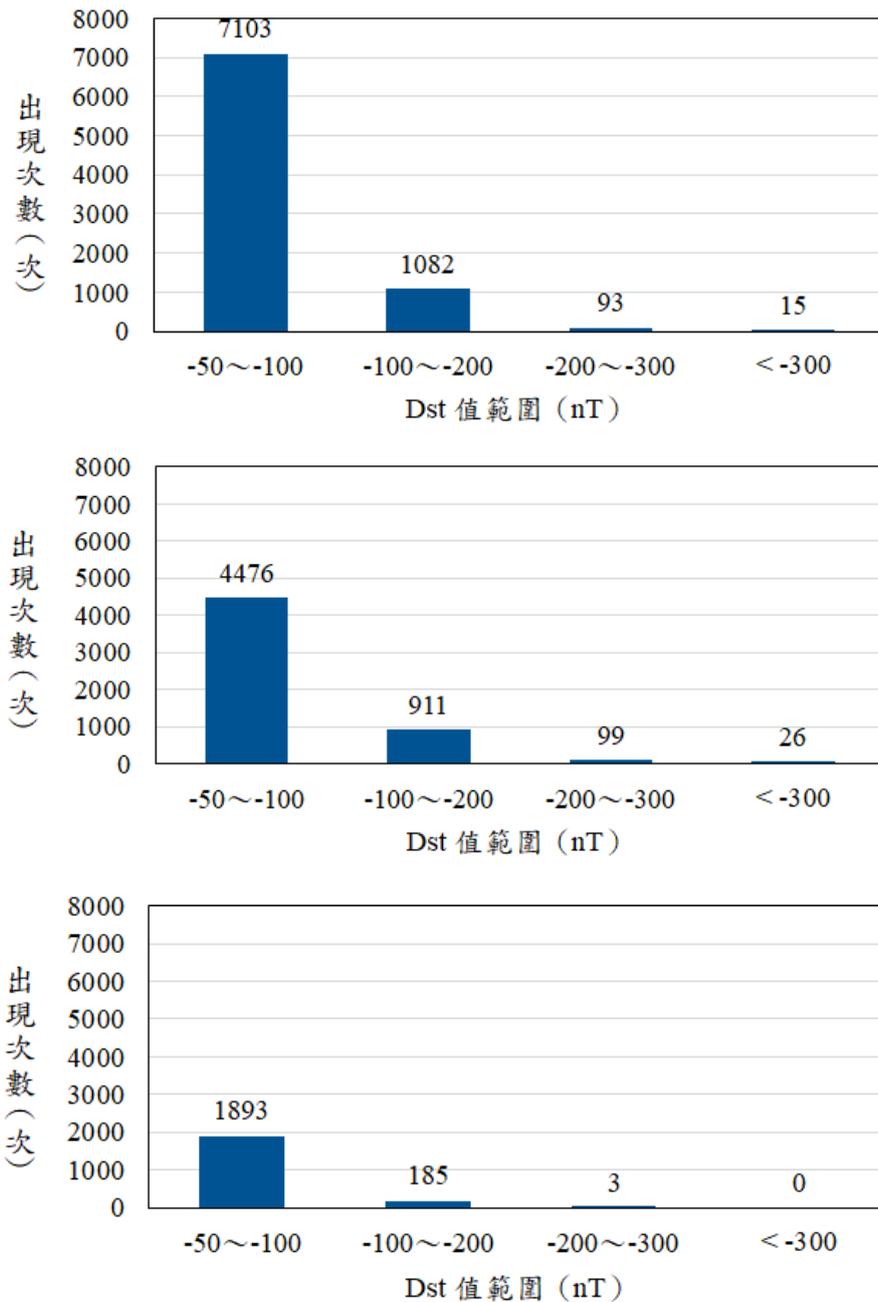
太陽週期 24 活躍期共有 41 起磁暴事件，其中 6 起事件較為複雜，單低谷型磁暴事件為 35 起，約佔 85.37 %；其安靜期則共有 68 起事件，其中 9 起事件較為複雜，單低谷型磁暴事件有 58 起，約佔 86.76 %。

以圖十二之 2003 年 10 月 29 日至 31 日的強烈的複雜磁暴事件為例，由圖中 Dst 指數及 SYM-H 指數隨時間變化圖可知，地磁出現了三次劇烈的變化，Dst 指數分別達到 -151、-353、-383 nT。而從各太陽風物理量觀測資料，也可推斷當時太空天氣情形相當劇烈，甚至出現超過 1000 km/s 的高速太陽風。然因此事件出現多次低谷值，推論其受太陽風影響的情形較為複雜，難以單一物理量極值代表太陽風對地球磁層的影響，再加上其事件前後的太陽風物理量觀測資料有所缺漏，本研究未將此強烈的磁暴事件納入分析範圍。



圖十二：2003 / 10 / 29 ~ 31 磁暴事件。由上到下為 Dst 指數、SYM-H 指數、行星際磁場南北分量、太陽風動壓、質子密度、太陽風風速隨時間的變化圖。圖中紅色虛線表示 Dst 指數、SYM-H 指數等於 -50 nT 及行星際磁場南北分量等於 0 的分界線（圖片資料來源：CDA web）

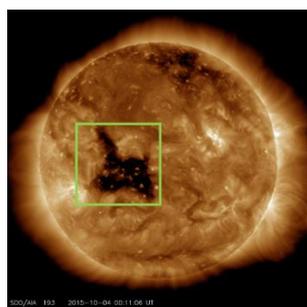
又如圖十三所示，雖然太陽週期 22 期間 Dst 指數小於 -200 的次數較太陽週期 24 多，但由於事件篩選的過程，以及太陽風物理量觀測資料完整程度的考量，部分強烈磁暴事件並未納入後續相關性分析對象。期待未來能進一步以其他方式分析本研究目前未分析的複雜磁暴事件。



圖十三：太陽週期 22（上）、23（中）、24（下）Dst 指數小於 -50 的出現次數分布情形（圖片資料來源：研究者自行繪製）

(二) 磁暴事件強度分布

根據圖六分析結果，安靜期期間，Dst 最小值在 -51 至 -60 nT 之間強度較弱的磁暴事件比例，較活躍期高，與原先的預期相符。而活躍期、安靜期皆有發生小於 -180 nT 強度較強的事件，推論活躍期及安靜期磁暴事件的太陽產生源應不盡相同。安靜期的磁暴事件可能由日冕洞 (coronal hole) 吹出的高速太陽風所引起。圖十四太陽影像的暗處即為日冕洞位置 (圖十四中綠框標示)。

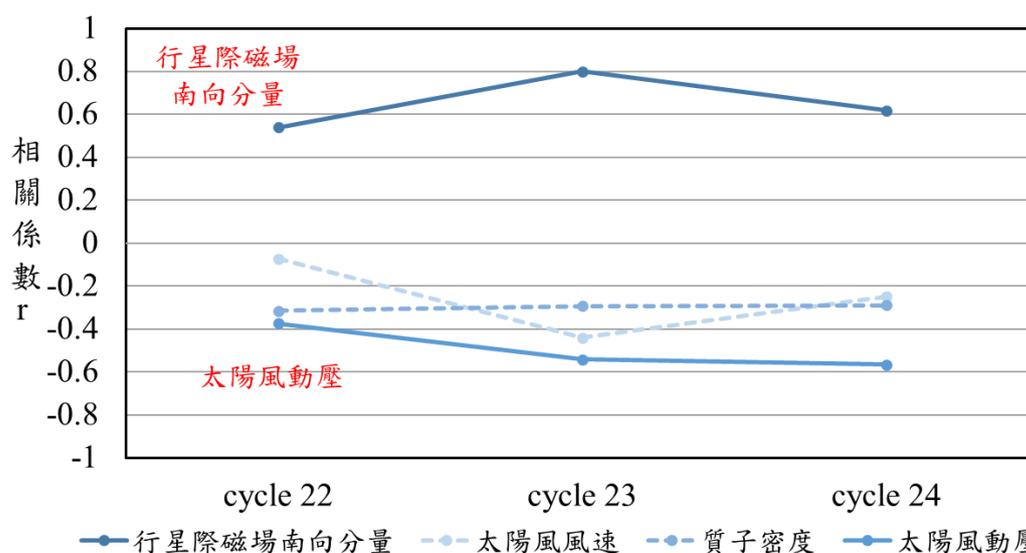


圖十四：2015 年 10 月 4 日太陽影像，對應 2015 年 10 月 7 日磁暴事件。圖中綠框標示日冕洞位置。(圖片資料來源：Solar Dynamics Observatory)

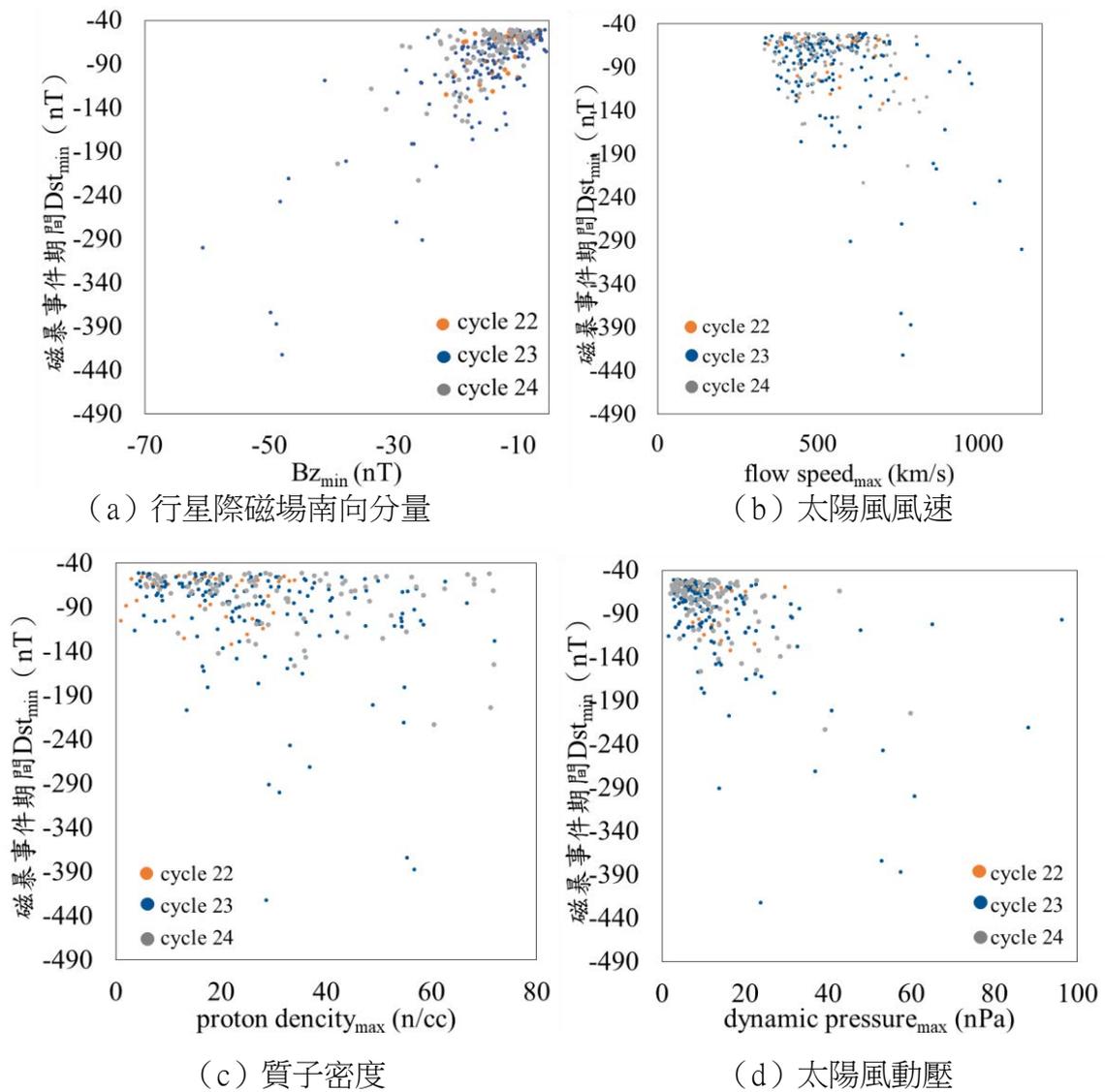
(三) 物理量相關性分析

由圖十五可以看出，與磁暴事件相關性愈高的物理量在折線圖中的位置，會距離 $y=0$ 愈遠。故相關性最高者為行星際磁場的南向分量 (其為負值)，其次為太陽風動壓。

推論行星際磁場南向分量相關性較高，可能由於南向行星際磁場會和地球日側磁場發生作用，影響環形電流；而太陽風動壓則對地球日側磁層造成正向力的壓迫，因此南向行星際磁場對地表低緯度磁場擾動的影響較太陽風動壓大，故相關性較高。又太陽風是綜合質子密度與太陽風風速的變化，故太陽風動壓的相關性較太陽風風速、質子密度的相關性高。



圖十五：各太陽週期磁暴期間 Dst 最小值對行星際磁場南向分量、太陽風風速、質子密度、太陽風動壓相關性折線圖 (圖片資料來源：研究者自行繪製)



圖十六：a ~ d 分別為太陽週期 22 至 24 行星際磁場南向分量、太陽風風速、質子密度、太陽風動壓對磁暴事件強度散佈圖（圖片資料來源：研究者自行繪製）

(四) 磁暴事件強度迴歸分析

由物理量分析可以看出行星際磁場南向分量和太陽風動壓與 Dst 最小值最為相關，與前人研究採用的物理量相符。如 Wooyeon Park 等人於 2021 年與 Burton 等人於 1975 年的研究中，皆使用太陽風動壓值的平方根作為 Dst 經驗式的變量。

本研究的經驗式原先經過數據分析採用行星際磁場南向分量和太陽風動壓的平方根之差作為變量，而最終採用行星際磁場南向分量和太陽風動壓的對數值作為經驗式的變數，此方法可解決兩變量單位不同之問題，也能結合兩種影響磁暴的因素。

(五) 觀測太陽風物理量情形的磁暴可預警時間

一般而言，位於日地之間、日地連線附近的人造衛星，可用於觀測將抵達地球附近的太陽風狀況。例如 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的太空天氣預報中

心 (Space Weather Prediction Center, SWPC) 所採用 DSCOVR 衛星 (The Deep Space Climate Observatory), 繞著第一拉格朗日點運行, 大約距離地球 220 個地球半徑遠, 以平均太陽風風速 400 km/s 進行、磁層頂大約位於 10 地球半徑估算, 衛星能早於地球約一小時觀測到異常的太陽風情形並做出警報。

肆、結論與應用

- 一、分析太陽週期 22 至 24 單低谷型磁暴事件強度分布情形, 發現弱磁暴事件數目較強磁暴事件數目多, 且磁暴強事件強度越強, 事件所佔比例大致遞減。而安靜期有較強烈磁暴事件發生, 推論可能由日冕洞吹出的高速太陽風所引起。
- 二、行星際磁場的南向分量與太陽風動壓與磁暴事件最為相關, 相關係數可達 0.80 和 0.64。推論行星際磁場南向分量能與 2 地球磁場發生交互作用, 直接影響地球磁場擾動情形, 因此是物理量中相關係數最高者。太陽風動壓同時考慮了密度和速度兩個因素, 為相關係數次高的物理量。推論行星際磁場南向分量與太陽風動壓的觀測可作為磁暴事件先兆的依據。
- 三、從迴歸分析得出經驗式, 可用於磁暴事件的發生, R^2 值達 0.435。進一步從殘差分析可推論尚有其他因素將影響磁暴事件期間 Dst 最小值。
- 四、未來展望
 - (一) 本研究分析的單低谷型磁暴事件約佔所有磁暴事件的 48.7%, 且已提出合用的經驗式作為複雜太空天氣系統的初步探討, 期待未來進一步以多項式擬合磁暴事件強度與個別物理量的函數關係, 以更深入了解太陽風物理量的擾動影響事件強度的機制。
 - (二) 從磁暴事件強度迴歸分析, 推論還有其他未考慮的參數會影響磁暴事件期間 Dst 最小值, 這也可從文獻如 Wang 等人、Wooyeon Park 等人分別在 2003、2021 年提出的複雜關係式獲得佐證。希望透過分析物理量出現劇烈擾動與磁暴事件發展的延遲時間, 了解觀測物理量變化, 與磁暴實際發生的反應時間差。
 - (三) 期待未來進一步分析較為複雜的磁暴事件, 以更加全面的了解不同強度的磁暴事件差異; 並分析各週期的磁暴事件的異同, 探討太陽週期活動是否影響磁暴事件過程的物理機制。

伍、參考文獻

- 一、畢可為 (2016)。徑向行星際磁場事件之特性及其對磁層之影響 (博士論文)。取自臺灣博碩士論文知識加值系統。(系統編號 105NCU05069002)
- 二、Adebesin, O. B., Ikubanni, O. S., & Kayode, S. J. (2012). Solar wind dynamic pressure dependency on the plasma flow speed and IMF Bz during different geomagnetic activities. *World Journal of Young Researchers*, 2(3), 43-53.
- 三、Burton RK, McPherron RL, Russell CT.(1975). An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *J Geophys*, 80(31),4204 – 4214.
- 四、Khabarova, O.V.(2007). Current Problems of Magnetic Storm Prediction and Possible Ways of Their Solving. *Sun and Geosphere*, 2(1), 32-37.
- 五、Park, W., Lee, J., Kim, K. C., Lee, J., Park, K., Miyashita, Y., ... & Yi, Y. (2021). Operational Dst index prediction model based on combination of artificial neural network and empirical model. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 11, 38.
- 六、Pi, G., Shue, J. H., Park, J. S., Chao, J. K., Yang, Y. H., & Lin, C. H. (2016). A comparison of the IMF structure and the magnetic field in the magnetosheath under the radial IMF conditions. *Advances in space research*, 58(2), 181-187.
- 七、Rathore, B. S., Kaushik, S. C., Firoz, K. A., Gupta, D. C., Shrivastava, A. K., Parashar, K. K., & Bhaduriya, R. M. (2011). A Correlative Study of Geomagnetic Storms Associated with Solar Wind and IMF Features During Solar Cycle 23. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 1(2), 149-154.
- 八、Wang, C. B., Chao, J. K., & Lin, C. H. (2003). Influence of the solar wind dynamic pressure on the decay and injection of the ring current. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A9).
- 九、Wanliss, J. A., & Showalter, K. M. (2006). High-resolution global storm index: Dst versus SYM-H. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A2).
- 十、Why counting sunspots by eye nowadays, in the space era?(2019, November 25). SILSO: Frequently Asked Questions. Retrieved October 3, 2020, from <http://sidc.be/silso/faq2>

【評語】 160019

本作品探討磁暴事件強度與太陽風性質及行星際磁場的可能關聯。作者從數據庫中找出第 22, 23, 24 太陽週期裡的磁暴事件，確認了行星際磁場及太陽風風壓與磁暴事件強度最有關聯。目前已進行其中關係的擬合，建議應更定量描述擬合結果的好壞程度及最佳擬合參數的誤差大小，這樣除了可以做磁暴預警以外，也可提供給理論工作參考。本作品經進一步加強後，將是一項極好的作品。