0254-6124/2022/42(3)-0346-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YU Jiabin, TONG Jizhou, FANG Shaofeng, HU Xiaoyan. Transfer Entropy Approach to Discovering the Ranking of Solar Wind Drivers to Geomagnetic Storm (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 346–356. DOI:10.11728/cjss2022.03.210406045

利用转移熵研究引起磁暴扰动的太阳风参数重要性排序*

于佳斌[1,2] 佟继周[1] 方少峰[1] 胡晓彦[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 磁暴是重要空间天气灾害性事件，能够影响卫星的安全在轨运行和地面电网系统等。目前，对于太阳风–磁层相互作用的研究多集中在分析相关系数的线性关系，而基于信息论的转移熵可以提供强大的无模型有向统计量，可用来分析传统相关性分析和模型假设检测不到的非线性关系。本文利用转移熵的方法，研究了磁暴期间的太阳风驱动参数。利用第 23 和 24 太阳活动周的小时精度数据进行长时间尺度分析，发现太阳风向地磁的信息传递呈双峰分布，表现出与太阳活动水平的一致性。利用 2010－2018 年 93 个地磁暴期间的分钟精度数据进行短时间尺度分析，结果表明：行星际电场（E）和行星际磁场南向分量（B_z）对地磁指数 Sym-H 在时间延迟为 60 min 时信息传递较强，而太阳风速度 v_{sw}、温度 T_{sw}、数密度D_{sw}、磁场 B 和动压P_{sw}对 Sym-H 指数的信息传递较弱。上述研究结果能够为太阳风–磁层相互作用的建模提供参数选择及确定预测范围的依据。

关键词 太阳风，地磁暴，转移熵

中图分类号 P353

Transfer Entropy Approach to Discovering the Ranking of Solar Wind Drivers to Geomagnetic Storm

YU Jiabin[1,2] TONG Jizhou[1] FANG Shaofeng[1] HU Xiaoyan[1]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Geomagnetic storm is an important disaster event in space weather, which can affect satellite orbit and ground power system. At present, in the solar wind-magnetosphere system, most studies focus on the linear relationships analyzed by the correlation coefficient. However, transfer

* 中国科学院战略性先导科技专项（A 类）空间科学（二期）地面支撑项目科学卫星数据处理与管理技术课题资助（XDA15040200）

2021-04-06 收到原稿，2022-01-29 收到修定稿

E-mail：18332043150@163.com

entropy can provide powerful model-free directed statistics, which can be used to analyze non-linear relationships that cannot be detected by traditional correlation analysis and model hypothesis. The hourly resolution data of solar activity cycle 23 and 24 were used to analyze the large time scale. The information transmission of solar wind and geomagnetic has a bimodal distribution, which is consistent with the solar activity level. Using the minute resolution data of 93 geomagnetic storms from 2010 to 2018 for small time scale analysis, the results show that E, IMFB_z have strong information transmission to the geomagnetic Sym-H parameter when the time delay is 60 minutes, while $v_{\rm sw}$, $T_{\rm sw}$, $D_{\rm sw}$, B, $P_{\rm sw}$ are lower. It provides the basis for parameter selection and prediction range determination for solar wind-geomagnetic model construction.

Key words Solar wind, Geomagnetic storm, Transfer entropy

0 引言

太阳风–磁层相互作用形成了一个多尺度耦合的复杂系统, 太阳风是引起地磁暴的最主要驱动源, 例如当行星际磁场南向时, 行星际磁场可与地球磁场发生磁场重联, 较易引发磁暴。因而, 理解太阳风变化对地磁场的影响机制, 是预报地磁暴的关键之一。

有关太阳风与地磁扰动之间的相关性研究, 新方法不断出现, 这些方法主要基于太阳风和地磁参数的解析关系、相关系数或预报模型, 线性回归、统计相关等方法, 已被证实是认识磁暴时地磁变化的有效方法, 例如 Liu 等[1] 研究了太阳活动上升年的地磁 Kp 指数与行星际磁场南向分量B_z、太阳风速度$v_{\rm sw}$、太阳风温度$T_{\rm sw}$与太阳风数密度 $D_{\rm sw}$ 的相关性, 相关系数分别为 0.66、0.03、0.58 和–0.45, 发现有一类磁暴与B_z 地磁场重联无关。Cane 等[2] 统计结果表明行星际磁场南向分量B_z与磁暴扰动指数最小值$Dst_{\rm min}$的相关系数为 0.74; Wu[3] 统计分析了 1995－1998 年 Wind 数据, 证实$v_{\rm sw}B_{z_{\rm min}}$与$Dst_{\rm min}$的相关系数为 0.87, 略高于行星际磁场南向分量最小值$B_{z_{\rm min}}$与磁暴扰动指数最小值$Dst_{\rm min}$的相关系数 0.81。Zhang 等[4] 发现行星际电场 E 与Dst指数有很好的相关性, 并且在中、强等地磁活动期间, 存在显著的突变特征曲线, 相对于$v_{\rm sw}$, $v_{\rm sw}^2B_z$, $v_{\rm sw}B^2$和能量耦合函数$\varepsilon = v_{\rm sw}B^2l_0^2\sin^2(\theta/2)$, 行星际电场 E 的突变特征曲线更易识别。Zhao 等[5] 的研究表明在诸多参数中, 就单一因素来说, 行星际电场 E 对磁暴强度影响最大, 行星际磁场南向分量B_z对磁暴强度影响次之; Khabarova 等[6] 和 Ahmed 等[7] 也得到了相似的结果。除此之外, Iyemori 等[8] 首次成功地应用线性预测滤波方法, 基于太阳风参数预测了地磁活动, Ji 等[9] 和 Rastätter 等[10] 用经验和物理模型、Ahmed 等[7] 用神经网络对磁暴进行预报研究。然而, 地磁系统对太阳风变化的响应是非线性的, 线性统计不足以表达其完备的相关性, 同时在使用各种预报模型时, 不同的输入参数对磁暴的影响和重要性仍不明确, 关于哪个太阳风参数对磁暴的发生更重要, 还未有统一的认识。

近年来, 基于信息论的新方法[11] 被提出并成功地应用于揭示地球磁层–电离层系统响应太阳风变化的复杂动力学特征。Michelis 等[12] 以地磁活动指数 AL 和 Sym-H 分别定量化亚暴和磁暴过程, 进行了双变量转移熵分析, 结果表明亚暴和磁暴之间的信息流动方向取决于全球地磁活动水平。Wing 等[13] 利用信息论进行太阳风–地球辐射带系统研究, 利用互信息、条件互信息和转移熵对能量范围为 1.8～3.5 MeV 的地球同步轨道高能电子通量的太阳风驱动因素进行了研究, 得出了基于信息论分析的重要性排序。转移熵可以提供强大的无模型统计量, 在太阳风–地球辐射带系统研究已经得到了验证, 但目前还未在太阳风–磁层整体耦合系统中得到应用。本文利用转移熵研究太阳风参数与地磁指数之间的非线性关系, 应用转移熵来衡量磁暴时的太阳风驱动因素并进行量化, 对不同太阳风参数的重要性进行研究。

1 数据与方法

1.1 数据来源

用于研究的太阳风及地磁活动指数的数据均来

源于美国国家航空航天局(NASA)的 OMNI*公开数据,具体包括分钟分辨率数据(HRO)和小时分辨率数据(LRO),时间跨度从 1996 年到 2018 年。OMNI 整合了来自 ACE、WIND、IMP8 等航天器的太阳风磁场和等离子体数据集,并根据实际的太阳风速度时移到地球的弓激波鼻尖处。此外,本研究还使用了世界地磁数据中心(WDC)提供的地磁 Sym-H 指数数据、比利时 SILSO 中心提供的太阳黑子数据、和加拿大自然资源部的太阳 10.7 cm 射电流量 $F_{10.7}$ 数据。

本研究利用美国空间天气研究中心(SWRC)提供的空间天气数据库(DONKI)**中提取的磁暴事件列表,共计 93 个事例,主要分布在第 24 太阳活动周期间的 2010 年到 2018 年。

1.2 相关系数与转移熵

1.2.1 相关系数算法

相关系数又称皮尔逊积矩相关系数,适用于度量两个变量 x 与 y 之间的线性相关性,其值介于 1 与–1 之间,即

$$r(x,y)=\frac{\mathrm{Cov}(x,y)}{\sqrt{\mathrm{Var}(x)\,\mathrm{Var}(y)}}. \tag{1}$$

直接推导可知

$$|r(x,y)|=\sqrt{1-\frac{\det(z)}{\det[\boldsymbol{C}(x)]\det[\boldsymbol{C}(y)]}}.$$

其中,$z=(x,y)$,$\boldsymbol{C}(z)=\left\langle (z-\langle z\rangle)\ (z-\langle z\rangle)^{\mathrm{T}}\right\rangle$为协方差矩阵。

时移相关系数[13]是皮尔逊积矩相关系数度量向两个时间序列$x(t)$和$y(t+\tau)$的拓展,即

$$r_{x\to y}(\tau)=r[x(t),y(t+\tau)].$$

其中τ为时间延迟。当相关函数有多个峰或没有明显的不对称时,这种分析的结果可能不是特别清楚。此外,相关系数是两个变量之间线性关系的一个度量,不能用于描述非线性关系。

1.2.2 转移熵算法

度量两个变量x和 y 之间依赖关系,更通用的方法是通过考虑

$$P(x,y)\overset{?}{=}P(x)\,P(y). \tag{2}$$

其中,$P(x,y)$为x和y的联合概率。如果式(2)等号成立,则表示变量x与 y 相互独立;相比式(1),除线性关系外,式(2)可以表达更多的非线性关系。

信息论中互信息[14]表示一个随机变量中包含的关于另一个随机变量的信息量,代表两个随机变量的依赖程度。

对于离散的概率分布,互信息的定义如下:

$$M(x,y)=\sum_{N_1N_2}p(x,y)\lg\frac{p(x,y)}{p(x)\,p(y)}. \tag{3}$$

其中,$x\in\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}\equiv N_1$,$y\in\{y_1,y_2,\cdots,y_n\}\equiv N_2$。对于连续概率分布,互信息的定义如下:

$$M(x,y)=\int p(x',y')\lg\frac{p(x',y')}{p(x')\,p(y')}\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'. \tag{4}$$

从式(3)和(4)可以看出,互信息$M(x,y)$对式(2)进行了定量描述,相比于相关系数,更好地表达了两个变量 x与 y 之间的依赖关系。进一步,如果 x与 y 服从联合高斯概率分布,互信息具有如下表达式[14]:

$$M(x,y)=-\frac{1}{2}\lg\left\{\frac{\det[\boldsymbol{C}(z)]}{\det[\boldsymbol{C}(x)]\det[\boldsymbol{C}(y)]}\right\}. \tag{5}$$

对比式(5)和互相关系数的定义式(1)可知,此时$|r(x,y)|=\sqrt{1-\mathrm{e}^{-2M(x,y)}}$,也就是说当 x 与 y 服从联合高斯概率分布时,互信息和互相关系数是等价的,例如当满足高斯分布的变量x与y 的相关系数$r(x,y)$=0.5 时,等价于$M(x,y)$=0.14 nats。

故而,可以对互信息$M(x,y)$建立如下归一化[14]:

$$\Lambda(x,y)=\sqrt{1-\mathrm{e}^{-2M(x,y)}}. \tag{6}$$

互信息的取值范围为$[0,\infty)$,经过转化$\Lambda(x,y)$的取值范围位于 $[0,1]$。特别地,当$\Lambda(x,y)=0$ 时,互信息$M(x,y)=0$,从其定义可知$p(x,y)=p(x)\,p(y)$,即x与 y 相互独立。

$\Lambda(x,y)$是一个同时包含线性和非线性关系的度量,而互相关系数 $r(x,y)$和 $\Lambda(x,y)$之间的差异

$$D_M=\Lambda-r. \tag{7}$$

可用于揭示变量之间除线性关系之外更复杂的关联关系。

当已知$z\in\{z_1,z_2,\cdots,z_n\}\equiv N_3$ 时,衡量x与 y 的互信息即条件互信息[13]有

* http://omniweb.gsfc.nasa.gov/

** https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/

$$M_{\mathrm{c}}(x,y|z)=\sum_{N_1N_2N_3}p(x,y,z)\lg\frac{p(x,y|z)}{p(x|z)\,p(y|z)}. \quad (8)$$

转移熵是一个量化两个系统相关程度或混沌程度的参数, 可用于处理有限长度的信号数据。转移熵定义由 Schreiber[15] 于 2000 年提出, 同时考虑源序列和目标序列的数据长度, 通用的转移熵定义为(默认单位为 nats)

$$T_{X\to Y}(\tau)=\sum_{N_1N_2}p\left[y(t+\tau),y_p(t),x(t)\right]\cdot \lg\left\{\frac{p\left[y(t+\tau)|y_p(t),x(t)\right]}{p\left[y(t+\tau)|y_p(t)\right]}\right\}. \quad (9)$$

其中, $y_p(t)=[y(t),y(t-\Delta),\cdots,y(t-k\Delta)]$, $k+1$ 为历史时间序列的长度, Δ为最小的取样间隔, τ为时间延迟。转移熵可以被视为一种特殊形式的条件互信息[13], 即

$$T_{X\to Y}(\tau)=M_{\mathrm{c}}\left[y(t+\tau),x(t)|y_p(t)\right]. \quad (10)$$

转移熵可以衡量系统中已知目标历史序列y_p的情况下, 有多少信息从输入序列X传递到目标序列Y的下一状态。转移熵与相关系数的不同在于方向性, 即 $T_{X\to Y}\neq T_{Y\to X}$。

转移熵算法容易受到有限大小样本效应的影响, 也容易受到数值效应的影响, 因此建立一个阈值来界定转移熵计算结果是否显著是必要的。为了检验计算结果的统计学意义, 将源序列 x 随机打乱重新抽样, 这一步骤保证了置换时间序列具有与原始序列相同的均值、方差、自相关函数, 但破坏了非线性关系。这个过程的目的是消除两个序列数据x与y之间的所有潜在关联关系, 因此计算得到的$T_{\mathrm{sur}(X)\to Y}$理论值为零。但是在有限时间序列中, 由于有限样本效应$T_{\mathrm{sur}(X)\to Y}$很少为零, 故而可以得到转移熵$T_{X\to Y}$高于$T_{\mathrm{sur}(X)\to Y}$即可认为是显著的。通过 100 次随机的零假设抽样计算$T_{\mathrm{sur}(X)\to Y}$, 若根据置换序列计算出的新$T_{\mathrm{sur}(X)\to Y}$值的 95% 小于原来$T_{X\to Y}$, 则可以认为原始序列计算得来的$T_{X\to Y}$显著。

1.2.3 算法比较

运用时移相关系数、转移熵分析行星际磁场南向分量 B_z 与地磁指数 Sym-H 之间的相关性。使用 1996－2018 年小时精度数据对时移相关系数和转移熵进行逐年计算。针对每一年的数据, 将时移相关系数$r_{x\to y}(\tau)=r[x(t),y(t+\tau)]$的最大时间延迟设置为 120 h, 以步长 1 h 逐步计算, 即每年共 120 个数据点, 然后取相关系数绝对值最大的数据点作为衡量该年B_z和地磁指数 Sym-H 之间的相关系数计算结果, 有

$$r(B_z,\text{Sym-}H)=\max\left[r_{B_z\to\text{Sym-}H}(\tau)\right],\quad \tau\in\{1,2,3,\cdots,120\}. \quad (11)$$

同理, 计算转移熵时采用同样的时间延迟设置和最大值选取方法, 由此可得图 1。图 1 中 1996 年行星际磁场南向分量与地磁指数的最大时移相关系数 $r(B_z,\text{Sym-}H)$=0.39; 在太阳活动高年 2000 年 $r(B_z,\text{Sym-}H)$=0.35, 同极小年的差异率为 11%。另外, 1996 年和 2000 年行星际磁场南向分量与地磁 Sym-H 指数之间的转移熵$T(B_z\to\text{Sym-}H)$分别为 0.18 nats、0.26 nats, 差异率为 31%。相关系数在太阳活动高低年的差异性相对较小, 转移熵在太阳活动高低年表现出明显的差异。与传统相关系数的对比表明, 转移熵可以有效表征太阳风–磁层关系的相关性。

如图 1 所示, 转移熵的变化趋势表现出类似太阳活动周变化的双峰结构。太阳活动水平在一定程度上影响着空间天气, 太阳黑子数(N_{ss})是描述太阳活动水平的重要指标, 计算得到太阳黑子和行星际磁场南向分量与地磁 Sym-H 指数之间的转移熵 $T_{B_z\to\text{Sym-}H}=T(B_z\to\text{Sym-}H)$的相关系数

$$r(N_{\mathrm{ss}},T_{B_z\to\text{Sym-}H})=0.74.$$

太阳黑子和行星际磁场南向分量与地磁 Sym-H 指数之间的转移熵$T_{B_z\to\text{Sym-}H}$的转移熵

$$T(N_{\mathrm{ss}}\to T_{B_z\to\text{Sym-}H})=0.20\ \text{nats}.$$

太阳黑子和行星际磁场南向分量与地磁 Sym-H

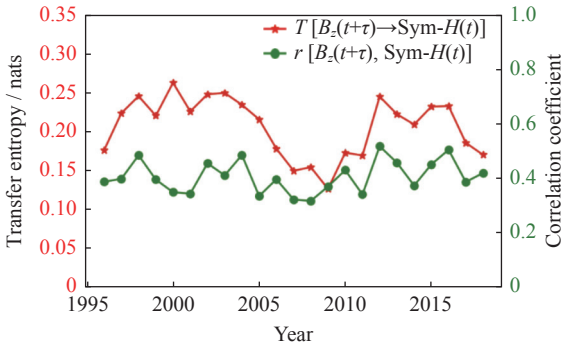


图 1 行星际磁场南向分量 B_z 与地磁 Sym-H 指数的转移熵和相关系数

Fig. 1 Transfer entropy and correlation coefficient between IMF B_z and Sym-H

指数之间的相关系数 $r_{B_z,\text{Sym-}H} = r(B_z, \text{Sym-}H)$的相关系数:

$$r(N_{\text{ss}}, r_{B_z,\text{Sym-}H}) = 0.11.$$

太阳黑子和行星际磁场南向分量与地磁 Sym-H 指数之间的相关系数$r_{B_z,\text{Sym-}H}$的转移熵

$$T(N_{\text{ss}}, r_{B_z,\text{Sym-}H}) = 0.0046 \text{ nats}.$$

对比结果得知,

$$r\,(N_{\text{ss}}, T_{B_z\to\text{Sym-}H}) > r(N_{\text{ss}}, r_{B_z,\text{Sym-}H}),$$

$$T\,(N_{\text{ss}} \to T_{B_z\to\text{Sym-}H}) > T(N_{\text{ss}}, r_{B_z,\text{Sym-}H}).$$

以太阳活动周期的角度看,各太阳风参数向地磁 Sym-H 指数信息传递的强弱与太阳活动水平的周期性变化一致。另外,太阳 10.7 cm 射电流量($F_{10.7}$)是综合衡量太阳色球、过渡区和日冕极紫外辐射强度的一种常用指数,以 $F_{10.7}$ 作为衡量太阳活动水平的指标可得

$$r(F_{10.7}, T_{B_z\to\text{Sym-}H}) = 0.70,$$

$$T(F_{10.7} \to T_{B_z\to\text{Sym-}H}) = 0.16 \text{ nats},$$

$$r(F_{10.7}, r_{B_z,\text{Sym-}H}) = 0.07,$$

$$T(F_{10.7}, r_{B_z,\text{Sym-}H}) = 0.0018 \text{ nats}.$$

以$F_{10.7}$刻画太阳活动强度,得到与太阳黑子数相同的结果。因此,转移熵可以更好地定量化太阳活动与太阳风–磁层系统的相关性。

2 太阳活动水平对太阳风–磁层相互作用的影响

以往太阳风–磁层耦合关系多参数影响因素的重要性研究,往往仅集中在个别太阳风参数,例如行星际磁场南向分量(B_z)或行星际电场(E),而与其他参数,例如行星际磁场大小(B)、太阳风速度(v_{sw})、太阳风数密度(D_{sw})、太阳风温度(T_{sw})、太阳风动压(P_{sw})等的综合研究较少涉及。Schwenn 等[16] 发现,地磁扰动在大小和方向上都与行星际磁场波动密切相关。长期南向的行星际磁场与地球磁场之间的相互连接允许太阳风能量传输到地球磁层[17]。包括 Kissinger 等[18] 在内的多项研究表明了太阳风速度在磁暴产生中的作用,事实上持续和增强的太阳风速度以及南向或北向的行星际磁场分量通常与行星际物质抛射有关,其被认为是磁暴的重要原因。另外,增强的太阳风密度也是一个经常影响磁暴强度的重要参数。太阳风密度的增大会导致日侧磁层顶的压缩,从而导致磁层顶流、场向流和横向流的增加。Ahmed 等[7] 的研究表明太阳风密度与其他参数协同具有更好的相关性,而太阳风温度则表现较差。Xie 等[19] 多篇论文描述了高速太阳风动压与磁暴的关系。Mcpherron 等[20] 的研究表明磁暴时的环电流积聚原则上可以直接由太阳风电场驱动。Kane[21] 表示磁暴期间太阳风速度与行星际磁场南向分量$v_{\text{sw}}B_z$的共同作用效果明显优于v_{sw}; Wang 等[22] 研究表明,对于磁暴的形成,$-\overline{v_{\text{sw}}B_z}$的重要性强于行星际磁场南向分量增强的持续时间$\Delta t$。

标识地磁活动水平的典型地磁指数,例如Dst指数,表征了全球对称赤道环电流的强度,是四个低纬天文台的地球磁场水平分量的小时平均值[7],而 Sym-H 为 1 min 分辨率的Dst指数。

2.1 太阳风参数与地磁指数的转移熵

实验使用 1996－2018 年小时精度的太阳风数据,主要分析参数包括行星际磁场(B)、行星际磁场南向分量 (B_z)、太阳风速度(v_{sw})、太阳风等离子体数密度(D_{sw})、太阳风温度(T_{sw})、太阳风动压(P_{sw})、行星际电场(E),以及小时精度的地磁 Sym-H 指数数据。

图 2 展示了利用转移熵方法分析各太阳风参数与地磁 Sym-H 指数的相关性结果,各太阳风参数向地磁指数的转移熵的相对值表现出一定的稳定性,

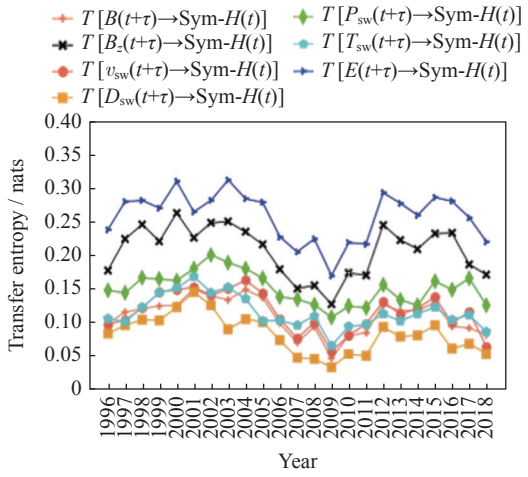


图 2 各太阳风参数对地磁 Sym-H 指数的转移熵

Fig. 2 Transfer entropy of multiple solar wind parameters to Sym-H

即: 1996—2018 年中, 行星际电场与地磁指数之间的信息传递 $T_{E\to\text{Sym-}H}$ 均最高, 随后是 $T_{B_z\to\text{Sym-}H}$ 和 $T_{P_{sw}\to\text{Sym-}H}$, 最低是 $T_{D_{sw}\to\text{Sym-}H}$; $T_{B\to\text{Sym-}H}$、$T_{v_{sw}\to\text{Sym-}H}$ 和 $T_{T_{sw}\to\text{Sym-}H}$ 位于中部且相互差异较小, 排名在各年中略有不同。各太阳风参数与地磁 Sym-H 指数转移熵的变化趋势表现类似于图 1 中行星际磁场南向分量与地磁 Sym-H 指数的转移熵相似的特性: (1)在太阳活动高年, $T_{sw\to\text{Sym-}H}$ 更为显著; (2)对于任一太阳风参数, $T_{sw\to\text{Sym-}H}$ 在第 24 太阳活动周的峰值比 23 太阳活动周要低。

2.2 转移熵与太阳活动水平相关性分析

如图 2 所示, 除行星际磁场南向分量外, 行星际磁场、太阳风速度、太阳风等离子体数密度、行星际电场及地磁 Sym-H 指数转移熵表现出与太阳活动周类似的双峰结构。同时将 $T_{sw\to\text{Sym-}H}$ 与太阳活动指数太阳黑子数、$F_{10.7}$ 进行相关性分析, 结果列于表 1。

由表 1 可知, $r(N_{ss}, T_{sw\to\text{Sym-}H})$ 位于 [0.61, 0.83] 之间、$r(F_{10.7}, T_{sw\to\text{Sym-}H})$ 位于 [0.58, 0.82] 之间, 均表现出较强的相关性。同时获得 $T(N_{ss}, T_{sw\to\text{Sym-}H})$ 位于 [0.15, 0.36] 之间、$T(F_{10.7}, T_{sw\to\text{Sym-}H})$ 位于 [0.12, 0.33] 之间, 即太阳活动指数与 $T_{sw\to\text{Sym-}H}$ 存在明显的信息传递。由此可知, 以小时精度的数据分析, 行星际磁场南向分量与太阳活动之间的强相关并非偶然, 其他各太阳风参数与太阳活动水平也存在较强的关联, 佐证了 Liu 等[23] 对于地球近地空间环境变化对太阳活动的依赖性。

3 引起磁暴扰动的太阳风参数重要性排序

3.1 数据选择

磁暴是指整个地球磁层发生的持续十几个小时到几十个小时的一种剧烈地磁扰动, 中低纬度地磁台站水平分量的显著减小为磁暴的主要特征。Wu 等[24] 的研究表明, 太阳扰动日变化在主相期间最强, 在恢复相期间逐渐减弱。在磁暴初相和主相期间, 一般会出现太阳风–磁层发电机效应, 将导致磁层对流电场快速渗透到中低纬度地区; 高纬焦耳加热产生全球热层扰动场, 主要出现在恢复相期间[25]。磁暴主相期间, 低纬水平磁场扰动(ΔH)在各磁地方时(MLT)均明显下降并且出现晨昏不对称分布; 磁暴恢复相期间, 行星际电场(E)为负值时, ΔH 较主相期间弱。已有的研究表明: 主相阶段主要源于环电流的增强, 而影响恢复相的主要为电荷损失机制, 包括电荷交换、库仑散射和波粒相互作用等[26]。因此, 由于不同的物理成因, 应分别研究磁暴主相和恢复相, 目前本文将研究范围限定于磁暴主相阶段。

表 1 $T_{sw\to\text{Sym-}H}$ 同太阳活动指数的相关性
Table 1 Correlation between $T_{sw\to\text{Sym-}H}$ and solar radiation

指标	相关系数		转移熵	
源序列目标序列	N_{ss}	$F_{10.7}$	N_{ss}	$F_{10.7}$
$T(B\to\text{Sym-}H)$	0.72	0.70	0.22	0.20
$T(B_z\to\text{Sym-}H)$	0.74	0.70	0.20	0.16
$T(T_{sw}\to\text{Sym-}H)$	0.83	0.82	0.36	0.33
$T(D_{sw}\to\text{Sym-}H)$	0.80	0.79	0.27	0.25
$T(v_{sw}\to\text{Sym-}H)$	0.74	0.72	0.26	0.23
$T(P_{sw}\to\text{Sym-}H)$	0.61	0.58	0.19	0.18
$T(E\to\text{Sym-}H)$	0.64	0.60	0.15	0.12

一般根据 Dst 峰值的不同, 将地磁暴分为小磁暴($-50\ \text{nT} < Dst_{\min} \leqslant -30\ \text{nT}$)、中等磁暴($-100\ \text{nT} < Dst_{\min} \leqslant -50\ \text{nT}$)、大磁暴($-200\ \text{nT} < Dst_{\min} \leqslant -100\ \text{nT}$)和特大磁暴($Dst_{\min} \leqslant -200\ \text{nT}$)四类; 若 $-30\ \text{nT} < Dst_{\min}$, 则认为当前处于地磁活动平静期。根据 DONKI 提供的磁暴列表, 其中小磁暴共计 6 个(约占 7%), 中等强度的磁暴共计 58 个(约占 62%), 大磁暴及特大磁暴共计 29 个(约占 31%)。磁暴事件的持续时间一般比较长, 个别磁暴事件的持续时间可能超过 24 h, 所以磁暴峰值的选取从开始时间向后搜索 48 h, 搜索期间 Dst 指数的最小值 $Dst_{\min}$ 作为该磁暴的峰值, 将峰值所对应的时间定为该磁暴的峰值时间(Peak Time)。在地磁暴的行星际起源研究中, Shi 等[27] 运用了类似的算法。由表 2 可知, 磁暴主相的平均持续时间不足 10 h, 因此分钟精度的 Sym-H 指数可以更细致地刻画磁暴主相的变化过程, 实验采用了 2010—2018 年分钟精度的太阳风数据, 以及分钟精度的地磁 Sym-H 指数数据。

3.2 重要性排序方法

以往研究结果表明, 地磁指数对太阳风变化的响应时间普遍小于 3 h[11,28], 本研究将响应时间范围设定在 0 至 500 min, 与 Stumpo 等[11] 研究磁层电离层

表 2 2010—2018 年磁暴事件

Table 2 Geomagnetic storm events from 2010 to 2018

Start time (UT)	Peak time (UT)	Dst_{min}/nT	Start time (UT)	Peak time (UT)	Dst_{min}/nT
2010-04-05 12:00	2010-04-06 07:40	–90	2015-07-04 13:00	2015-07-05 04:50	–86
2010-08-03 21:00	2010-08-04 01:10	–81	2015-08-15 09:00	2015-08-16 07:30	–93
2011-02-04 19:30	2011-02-04 21:22	–67	2015-08-23 06:00	2015-08-23 08:30	–59
2011-03-01 18:00	2011-03-01 20:40	–69	2015-08-27 03:00	2015-08-27 20:30	–100
2011-03-11 21:00	2011-03-11 23:36	–82	2015-08-27 21:00	2015-08-29 01:05	–54
2011-04-06 18:00	2011-04-06 19:03	–65	2015-09-09 03:00	2015-09-09 08:00	–110
2011-05-28 06:00	2011-05-28 11:11	–94	2015-09-11 06:00	2015-09-11 14:20	–94
2011-05-29 04:30	2011-05-29 06:53	–66	2015-09-20 06:00	2015-09-20 11:05	–84
2011-06-04 21:00	2011-06-05 05:19	–60	2015-10-07 18:00	2015-10-07 22:25	–124
2011-08-05 20:57	2011-08-06 03:22	–126	2015-11-07 03:00	2015-11-07 06:05	–106
2011-09-09 15:00	2011-09-10 04:26	–77	2015-12-20 03:00	2015-12-20 22:50	–169
2011-09-17 13:30	2011-09-17 18:29	–63	2015-12-31 13:30	2016-01-01 01:05	–117
2011-09-26 16:44	2011-09-26 21:19	–116	2016-02-17 21:00	2016-02-18 00:20	–59
2011-10-24 21:00	2011-10-25 01:15	–160	2016-03-06 18:00	2016-03-06 21:20	–109
2012-01-24 18:00	2012-01-25 10:45	–82	2016-03-11 12:00	2016-03-11 20:15	–30
2012-03-09 03:00	2012-03-09 08:13	–150	2016-04-02 21:00	2016-04-02 22:50	–65
2012-03-12 10:30	2012-03-12 16:55	–67	2016-05-02 03:00	2016-05-02 03:15	–55
2012-03-15 15:52	2012-03-15 19:53	–79	2016-05-08 00:00	2016-05-08 08:15	–103
2012-04-24 00:00	2012-04-24 03:26	–125	2016-06-06 03:00	2016-06-06 08:05	–55
2012-06-16 21:00	2012-06-17 12:53	–69	2016-06-14 18:00	2016-06-15 01:00	–33
2012-07-15 06:00	2012-07-15 10:04	–123	2016-09-01 21:00	2016-09-02 01:50	–72
2012-09-03 12:00	2012-09-04 07:51	–79	2016-09-27 15:00	2016-09-28 03:05	–48
2012-09-05 00:00	2012-09-05 07:43	–83	2016-09-28 18:00	2016-09-29 09:30	–64
2012-10-01 03:00	2012-10-01 03:52	–138	2016-10-13 15:00	2016-10-13 23:45	–114
2012-10-08 07:30	2012-10-09 02:10	–116	2016-10-25 12:00	2016-10-25 22:55	–80
2012-11-14 01:30	2012-11-14 07:27	–118	2016-11-25 03:00	2016-11-25 06:30	–52
2013-03-17 06:00	2013-03-17 20:28	–132	2016-12-21 15:00	2016-12-21 15:40	–52
2013-06-01 01:00	2013-06-01 07:48	–137	2017-03-01 23:00	2017-03-02 02:09	–60
2013-06-07 03:00	2013-06-07 04:39	–86	2017-03-27 09:00	2017-03-27 14:45	–86
2013-06-29 03:00	2013-06-29 06:34	–111	2017-04-20 03:00	2017-04-20 04:25	–47
2013-10-02 03:00	2013-10-02 06:19	–90	2017-04-22 03:00	2017-04-22 23:40	–52
2013-12-08 00:00	2013-12-08 08:30	–72	2017-05-27 21:00	2017-05-28 07:10	–141
2014-02-20 03:00	2014-02-20 05:55	–101	2017-07-16 12:00	2017-07-16 13:15	–66
2014-02-27 18:00	2014-02-27 23:25	–100	2017-08-22 00:00	2017-08-23 12:30	–51
2014-06-08 03:00	2014-06-08 06:50	–71	2017-09-07 21:00	2017-09-08 01:05	–144
2014-08-19 21:00	2014-08-21 07:50	–39	2017-09-08 12:00	2017-09-08 17:05	–111
2014-09-12 15:00	2014-09-12 23:05	–95	2017-09-14 15:00	2017-09-16 04:30	–44
2015-01-07 06:00	2015-01-07 11:00	–134	2017-09-27 18:00	2017-09-28 05:55	–74
2015-03-17 06:00	2015-03-17 22:45	–233	2017-10-13 12:00	2017-10-14 05:35	–67
2015-03-22 06:00	2015-03-22 08:05	–64	2017-11-07 18:00	2017-11-08 04:05	–89
2015-04-10 03:00	2015-04-11 09:25	–88	2018-03-18 21:00	2018-03-18 21:42	–53
2015-04-16 21:00	2015-04-16 23:40	–88	2018-04-20 06:00	2018-04-20 09:35	–86
2015-05-13 03:00	2015-05-13 06:45	–95	2018-05-06 00:00	2018-05-06 02:31	–66
2015-05-19 00:00	2015-05-19 02:55	–64	2018-08-26 00:00	2018-08-26 07:11	–206
2015-06-08 06:00	2015-06-08 07:45	–104	2018-09-11 06:00	2018-09-11 10:07	–64
2015-06-22 18:00	2015-06-23 04:25	–207	2018-11-05 03:00	2018-11-05 06:02	–66
2015-06-25 06:00	2015-06-25 19:45	–90			

对太阳风的响应时间范围一致。以往的转移熵往往集中在单个时间序列, 而磁暴期间的重要性系数为磁暴集合(见表 2)上的太阳风参数对地磁 Sym-H 指数的转移熵平均值, 故而定义

$$\overline{T}_{X\to\text{Sym-}H}(\tau)=\langle T_{X\to\text{Sym-}H}(\tau)\rangle . \tag{12}$$

其中$\langle\bullet\rangle$代表在表 2 磁暴集合上的平均值。

相应地由转移熵定义的重要性系数为

$$\Gamma=T_{\text{peak}}-\langle\eta\rangle , \tag{13}$$

$$T_{\text{peak}}=\max\left[\overline{T}_{X\to\text{Sym-}H}(\tau)\right] , \tag{14}$$

$$\eta=T_{\text{sur}(X)\to\text{Sym-}H}. \tag{15}$$

以及定义信噪比(S/N), 显著性检验指标

$$\delta_{S/N}=T_{\text{peak}}/\eta, \tag{16}$$

$$\alpha_{\text{sig}}=\Gamma/\sigma(\eta) . \tag{17}$$

转移熵算法通过置换时间序列[15]来创建零假设下的概率分布来计算噪声, 噪声的均值和标准偏差是由 100 次随机的零假设抽样计算$T_{\text{sur}(X)\to\text{Sym-}H}$平均而来。

3.3 重要性排序

对行星际磁场南向分量(B_z)和地磁 Sym-H 指数之间的转移熵进行计算, 分析两者之间的信息流动。首先对每个磁暴事件进行独立的转移熵分析, 而后按照式(12)以相同的时间延迟 τ 计算多个磁暴事件转移熵$T_{B_z\to\text{Sym-}H}(\tau)$的平均值$\overline{T}_{B_z\to\text{Sym-}H}(\tau)$。由图 3 可以看出, 转移熵$\overline{T}_{B_z\to\text{Sym-}H}$在$\tau=60$ min时达到最大值T_{peak}=0.244 nats、Γ=0.196 nats, 信噪比$\delta_{S/N}$=4.15和显著性α_{sig}=36.83σ。转移熵$\overline{T}_{B_z\to\text{Sym-}H}$明显大于噪声$\eta_{B_z\to\text{Sym-}H}$, 即信息传递显著。而$\overline{T}_{\text{Sym-}H\to B_z}$基本都处于背景噪声的内部或边缘, 不显示任何明显的时间

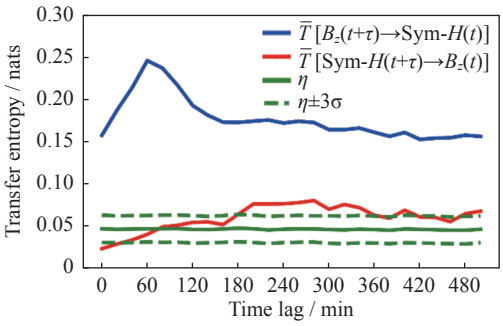


图 3 行星际磁层南向分量B_z和地磁Sym-H指数的转移熵

Fig. 3 Transfer entropy of B_z and Sym-H

延迟特征, 信息传递不显著。

经比较, 上述结果与 Runge 等[28]的结论基本一致, 即行星际磁场南向分量(B_z)扰动是导致行星际条件变化的重要部分; Stumpo 等[11]的研究也表明, 在时间延迟$\tau=60$ min 时行星际磁场南向分量(B_z)与 Sym-H 指数之间有较强的信息传递。但是已有研究并未涉及太阳风温度(T_{sw})、行星际电场(E)等太阳风参数的综合比较。进一步利用转移熵分析磁暴期间其他太阳风参数, 包括行星际磁场(B)、太阳风速度(v_{sw})、太阳风等离子体数密度(D_{sw})、太阳风温度(T_{sw})、太阳风动压(P_{sw})和行星际电场(E), 对 Sym-H 指数的影响, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 各太阳风参数对地磁 Sym-H 指数的转移熵$\overline{T}_{\text{sw}\to\text{Sym-}H}$均高于噪声; 而$\overline{T}_{\text{sw}\to\text{Sym-}H}$则处于噪声边缘, 缺乏显著性。$\overline{T}_{\text{sw}\to\text{Sym-}H}$最大值出现的时间普遍小于 3 h, 反应出磁层对太阳风变异性的响应是突变式的激增, 表现为短时间内一个强烈的信息传递。表 3 根据各太阳风参数到地磁 Sym-H 指数的转移熵, 得出了各太阳风参数的重要性系数序列。

由表 3 可知, 以转移熵构建的重要性系数为指标, 排在第一位的是行星际电场(E), Γ_E=0.200 nats。第二位是行星际磁场南向分量(B_z), Γ_{B_z}=0.196 nats, 略低于Γ_E。然后排名依次是太阳风速度(v_{sw})、太阳风温度(T_{sw})、太阳风密度(D_{sw})、行星际磁场(B)。最低的是太阳风动压(P_{sw}), $\Gamma_{P_{\text{sw}}}$=0.135 nats。

值得注意的是图 4(f), 行星际电场(E)对地磁 Sym-H 指数的转移熵$\overline{T}_{E\to\text{Sym-}H}$在$\tau=60$ min时达到最大值T_{peak}=0.252 nats、Γ=0.200 nats, 信噪比$\delta_{S/N}$=3.92 和显著性α_{sig}=37.43σ, 也有明显的信息传递, 甚至比$\overline{T}_{B_z\to\text{Sym-}H}$更强烈。

表 3 中排在第三位的是太阳风速度(v_{sw}), 结合图 4(d) 可知$\overline{T}_{v_{\text{sw}}\to\text{Sym-}H}$ 在$\tau=140$ min 时达到最大值T_{peak}=0.210 nats、Γ=0.159 nats, 信噪比$\delta_{S/N}$=3.15和显著性α_{sig}=29.92σ。行星际磁场南向分量和磁层的重联是引发磁暴等空间天气事件的重要因素。Zhang 等[4]进一步得出, 行星际磁场南向分量与太阳风速度的联合作用又体现于行星际电场的时变曲线, 统一表现为行星际电场, 太阳风速度的变化影响着磁层对流电场, 从而影响环电流的形成快慢与强度。因此, 从信息传递的角度分析, 行星际电场扰动是磁暴发生的主要驱动因素。以往太阳风温度(T_{sw})、太阳

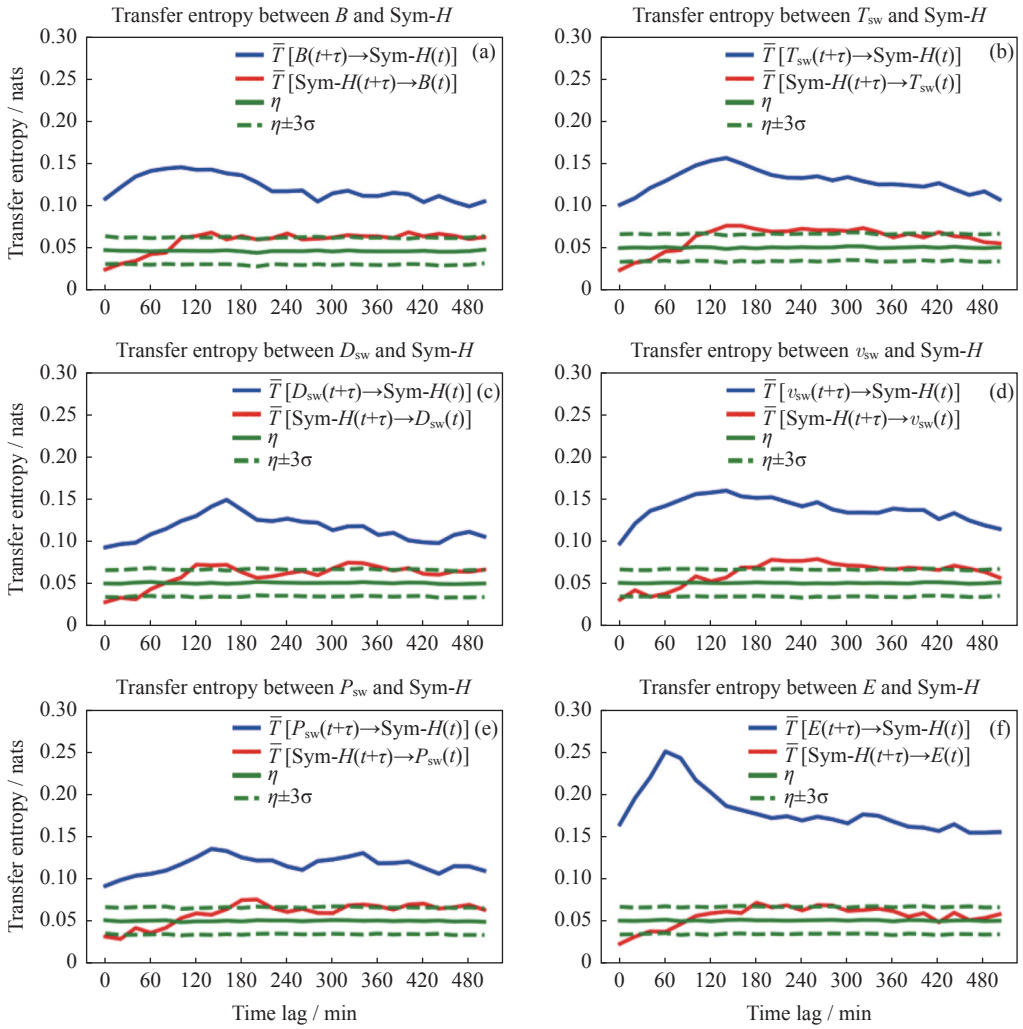


图 4 行星际磁场（B）、太阳风速度（v_{sw}）、太阳风等离子体数密度（D_{sw}）、太阳风温度（T_{sw}）、太阳风动压（P_{sw}）、行星际电场（E）对地磁 Sym-H 指数的转移熵

Fig. 4 Transfer entropy of interplanetary magnetic field (B), solar wind speed (v_{sw}), solar wind plasma number density (D_{sw}), solar wind temperature (T_{sw}) solar wind dynamic pressure (P_{sw}), the interplanetary electric field (E) and Sym-H

表 3 太阳风参数对地磁 Sym-*H* 指数重要性系数排序

Table 3 Importance ranking of solar wind parameters to geomagnetic index Sym-*H*

序号	太阳风参数	Γ/nats	$\delta_{S/N}$ at τ_{max}	α_{sig} at τ_{max}	$\lvert r\rvert$	D_M
1	行星际电场(E)	0.200	3.92	37.43	0.473	0.101
2	行星际磁场南向分量(B_z)	0.196	4.15	36.83	0.462	0.107
3	太阳风速度(v_{sw})	0.159	3.15	29.92	0.322	0.200
4	太阳风温度(T_{sw})	0.157	3.08	29.17	0.224	0.285
5	太阳风密度(D_{sw})	0.148	2.93	28.00	0.244	0.262
6	行星际磁场(B)	0.146	3.10	27.45	0.290	0.213
7	太阳风动压(P_{sw})	0.135	2.68	25.58	0.209	0.277

风密度(D_{sw})、行星际磁场(B)、太阳风动压(P_{sw})等综合研究较少,从转移熵的角度出发,本文给出了这些太阳风参数在引发磁暴时的相对重要性。

以相关系数为基础进行排序,由表 3 中的$|r|$列可知,前三位仍是行星际电场(E)、行星际磁场南向分量(B_z)和太阳风速度(v_{sw}),但是行星际磁场(B)的相对重要性提升至第四位,太阳风温度(T_{sw})下降至第六位。根据 1.2 节的讨论可知,相关系数仅能挖掘变量之间的线性关系,而从概率角度出发的转移熵可以挖掘变量之间更一般的非线性依赖关系,转移熵和相关系数排序的差异,表明了太阳风参数与地磁 Sym-H 指数之间关系的复杂性。进一步通过式(7)计算 D_M来对差异进行定量刻画,$D_M > 0$ 揭示太阳风–磁层之间线性关系之外更复杂的关联性。由此可知,相对于相关系数,转移熵方法可以更多地挖掘参数间的非线性关系,故而导致了重要性排序的差异。

综上所述,行星际电场(E)的变化是引发地磁暴的主要驱动因素,这与 Zhao 等[5] 的研究结果基本一致。行星际磁场南向分量(B_z)与地磁 Sym-H 指数之间的重要性系数略低于Γ_E,但是明显高于其他太阳风参数的Γ_{sw}。太阳风动压(P_{sw})与地磁 Sym-H 指数之间的重要性系数最低;其他各太阳风参数在引发磁暴时的相对关联程度由表 3 给出。

4 结论

应用转移熵研究了地磁扰动的太阳风驱动因素,可以得出如下结论。

(1)从太阳活动周期的角度分析,各太阳风参数向地磁 Sym-H 指数信息传递的强弱与太阳活动水平的周期性变化一致。

(2)磁暴期间各太阳风参数向地磁 Sym-H 指数信息传递,最相关的变量是行星际电场(E),行星际磁场南向分量(B_z)次之,然后排名依次是太阳风速度(v_{sw})、太阳风温度(T_{sw})、太阳风等离子体数密度(D_{sw})、行星际磁场(B),最弱的是太阳风动压(P_{sw}),各参数信息传递强弱排名见表 3。

(3) 行星际电场与地磁指数之间的信息传递 $T_{E\to\text{Sym-}H}$在τ_{max}=60 min 处达到峰值,比$T_{B_z\to\text{Sym-}H}$略高,佐证了 Zhao 等[5] 的研究。

在研究太阳风–磁层系统响应太阳风条件变化时,运用转移熵可以推断太阳风–磁层的非线性关系。本文将转移熵方法推广至磁暴事件集合上的平均转移熵,定义了磁暴期间太阳风参数与地磁 Sym-H 指数的重要性系数,并综合考虑了 7 种太阳风参数,以重要性系数为依据获得了引发磁暴扰动的太阳风参数重要性排序。转移熵定量描述太阳风与磁层参数之间的非线性信息传递,为探索磁层对行星际太阳风扰动的响应过程提供一条数据驱动的研究途径,为模型研究提供参数选择的依据,由此可加速建模过程。未来转移熵在空间天气领域可以通过更多事件统计研究开展广泛应用。

致谢 数据分析环境由国家科技资源共享服务平台之一的国家空间科学数据中心 (http://www.nssdc.ac.cn) 提供。

参考文献

[1] LIU Shaoliang, CHEN Jianli. Two possible modes of the interactions between the solar wind and the magnetosphere[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1988, **8**(1): 35-38 (刘绍亮, 陈剑利. 太阳风和地球磁层相互作用的两种可能类型[J]. 空间科学学报, 1988, **8**(1): 35-38)

[2] CANE H V, RICHARDSON I G, ST CYR O C. Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(21): 3591-3594

[3] WU C C. Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms: the first 4 years of Wind[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(A10): 1314

[4] ZHANG Jichun, TIAN Jianhua, PU Zuyin. Correlations of *Dst* index with the interplanetary electric field[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2001, **21**(4): 297-304 (张继春, 田剑华, 濮祖荫. 行星际电场与*Dst*指数[J]. 空间科学学报, 2001, **21**(4): 297-304)

[5] ZHAO Mingxian, LE Guiming, LIU Yujie. Study on the relationship between interplanetary disturbances and magnetic storms with different intensities[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, **26**(6): 421-426 (赵明现, 乐贵明, 刘玉洁. 行星际扰动与不同级别磁暴强度关系的研究[J]. 空间科学学报, 2006, **26**(6): 421-426)

[6] KHABAROVA O, PILIPENKO V, ENGEBRETSON M J, *et al*. Solar wind and interplanetary magnetic field features before magnetic storm onset[C]// Proceedings of the Eighth International Conference on Substorms (ICS-8). Alberta: University of Calgary Press, 2006: 127-132

[7] AHMED L, EL-ERAKI M A, SAMY A, *et al*. Prediction of the *Dst* index and analysis of it's dependence on solar wind parameters using neural network[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(9): 1277-1290

[8] IYEMORI T, MAEDA H. Prediction of geomagnetic activities from solar wind parameters based on the linear prediction theory[C]//Proceedings of Solar-Terrestrial Predictions Proceedings, Vol. 4: Prediction of Terrestrial Effects of Solar Activity. Boulder: U. S. Dept. of Commerce, 1980

[9] JI E Y, MOON Y J, GOPALSWAMY N, *et al*. Comparison of *Dst* forecast models for intense geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A3): A03209

[10] RASTÄTTER L, KUZNETSOVA M M, GLOCER A, *et al*. Geospace environment modeling 2008-2009 challenge: *Dst* index[J]. *Space Weather*, 2013, **11**(4): 187-205

[11] STUMPO M, CONSOLINI G, ALBERTI T, *et al*. Measuring information coupling between the solar wind and the magnetosphere–ionosphere system[J]. *Entropy*, 2020, **22**(3): 276

[12] DE MICHELIS P, CONSOLINI G, MATERASSI M, *et al*. An information theory approach to the storm-substorm relationship[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A8): A08225

[13] WING S, JOHNSON J R, CAMPOREALE E, *et al*. Information theoretical approach to discovering solar wind drivers of the outer radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(10): 9378-9399

[14] TSONIS A A. Probing the linearity and nonlinearity in the transitions of the atmospheric circulation[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2001, **8**(6): 341-345

[15] SCHREIBER T. Measuring information transfer[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(2): 461-464

[16] SCHWENN R, DAL LAGO A, HUTTUNEN E, *et al*. The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth[J]. *Annales Geophysicae*, 2005, **23**(3): 1033-1059

[17] GONZALEZ W D, JOSELYN J A, KAMIDE Y, *et al*. What is a geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A4): 5771-5792

[18] KISSINGER J, MCPHERRON R L, HSU T S, *et al*. Steady magnetospheric convection and stream interfaces: relationship over a solar cycle[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A5): A00I19

[19] XIE H, GOPALSWAMY N, ST CYR O C, *et al*. Effects of solar wind dynamic pressure and preconditioning on large geomagnetic storms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(6): L06S08

[20] MCPHERRON R L, BAKER D N, BARGATZE L F, *et al*. IMF control of geomagnetic activity[J]. *Advances in Space Research*, 1988, **8**(9/10): 71-86

[21] KANE R P. How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A2): A02213

[22] WANG Y M, SHEN C L, WANG S, *et al*. An empirical formula relating the geomagnetic storm's intensity to the interplanetary parameters: $-1 \sim 284$ and Δt [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(20): 2039

[23] LIU Libo, WAN Weixing, CHEN Yiding, *et al*. Solar activity effects of the ionosphere: a brief review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(12): 1202-1211 (刘立波, 万卫星, 陈一定, 等. 电离层与太阳活动性关系[J]. 科学通报, 2011, **56**(12): 1202-1211)

[24] WU Yingyan, XU Wenyao, CHEN Gengxiong, *et al*. The evolution characteristics of geomagnetic disturbances during geomagnetic storms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, **50**(1): 1-9 (吴迎燕, 徐文耀, 陈耿雄, 等. 磁暴期间几种主要磁扰成分的演化特征[J]. 地球物理学报, 2007, **50**(1): 1-9)

[25] BLANC M, RICHMOND A D. The ionospheric disturbance dynamo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1980, **85**(A4): 1669-1686

[26] KOZYRA J U, JORDANOVA V K, HOME R B, *et al*. Modeling of the contribution of Electromagnetic Ion Cyclotron (EMIC) waves to stormtime ring current erosion[M]//TSURUTANI B T, GONZALEZ W D, KAMIDE Y, *et al*. Magnetic Storms, Volume 98. Washington DC: American Geophysical Union, 1997: 187-202

[27] SHI Liangwen, SHEN Chenglong, WANG Yuming. The interplanetary origins of geomagnetic storm with $Dst_{\min} \leqslant -50$ nT in 2007－2012[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3822-3833 (史良文, 申成龙, 汪毓明. 2007－2012 年$Dst_{\min} \leqslant -50$ nT的中等以上地磁暴的行星际源统计[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(11): 3822-3833)

[28] RUNGE J, BALASIS G, DAGLIS I A, *et al*. Common solar wind drivers behind magnetic storm-magnetospheric substorm dependency[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 16987

(责任编辑: 孙伟英)