0254-6124/2026/46(5)-0001-17 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Ziqian, LI Hui, WANG Chi. Chinese Geomagnetic Index Based on Chinese Meridian Project Geomagnetic Data (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1–17. CSTR:32142.14.cjss.2025–0200. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0200

# 基于子午工程地磁数据构建中国区域地磁指数*

刘子谦[1] 李 晖[1,2] 王 赤[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

**摘 要** 地球磁层环电流所造成的中低纬度地区地表磁场水平分量的剧烈扰动, 可以通过暴时扰动 (*Dst*) 指数和对称 *H* 分量 (SYM-*H*) 指数来表征. *Dst* 指数和 SYM-*H* 指数作为衡量地磁活动的重要指标, 能够清楚反映磁暴的发生时间和强度. 由于磁暴期间环电流的不对称性, 不同地方时的地磁扰动水平存在显著差异, 而 *Dst* 指数和 SYM-*H* 指数作为全球地磁指数, 不一定能准确描述中国区域的地磁扰动情况. 本文利用子午工程拉萨、成都、武汉、杭州 4 个台站 2010－2024 年的地磁数据, 计算得到了中国区域地磁指数 (c*Dst* 指数、cSYM-*H* 指数), 并与全球地磁指数 (*Dst* 指数和 SYM-*H* 指数) 开展对比分析. 结果表明, 两类中国区域地磁指数能更准确地描述中国区域地磁扰动特征, 其与全球地磁指数的差异呈现晨昏侧依赖性: 中国位于昏侧时, 中国区域地磁指数绝对值大于全球地磁指数; 而位于晨侧时, 则小于全球地磁指数. 相应地, 中国位于昏侧时, 中国区域磁扰数量多于磁暴数量; 而位于晨侧时, 则少于磁暴数量. 这些现象的物理机制与环电流的晨昏不对称性密切相关. 同时, 基于中国区域地磁指数可有效反演全球地磁指数, 反演结果符合良好, 所以在全球地磁指数无法获取时, 可以提供高质量补充数据.

**关键词** 子午工程, *Dst* 指数, SYM-H 指数, 中国区域 *Dst* 指数, 中国区域 SYM-*H* 指数

**中图分类号** P353

# Chinese Geomagnetic Index Based on Chinese Meridian Project Geomagnetic Data

LIU Ziqian[1] LI Hui[1,2] WANG Chi[1,2]

1(*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100190)

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

**Abstract** The great disturbances of the horizontal component of the geomagnetic field in mid-low latitudes caused by the ring current in the Earth's magnetosphere can be characterized by the Disturbance Storm Time (*Dst*) index and the symmetric *H* component (SYM-*H*) index. The *Dst* index and SYM-*H* in-

* 国家自然科学基金基础科学中心项目 (42188101) 和国家自然科学基金基础科学中心项目 (42374198) 共同资助

2025-11-26 收到原稿, 2026-03-16 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

dex are important indicators for measuring geomagnetic activity, which can clearly reflect the commencement and intensity of geomagnetic storms. Due to the asymmetry of ring current during geomagnetic storms, there are significant differences in the geomagnetic disturbance intensity in different regions. As global geomagnetic index, *Dst* index and SYM-*H* index may not accurately describe the geomagnetic disturbance situation in China. We uses geomagnetic data from four stations in Lhasa, Chengdu, Wuhan, and Hangzhou of the Chinese Meridian Project from 2010 to 2024 to calculate the Chinese geomagnetic index (c*Dst* index, cSYM-*H* index), and compares and analyzes them with the global geomagnetic index (*Dst* index, SYM-*H* index). The results indicate that the two types of Chinese geomagnetic index can more accurately describe the characteristics of geomagnetic disturbances in China, and their differences from the global geomagnetic index show a dawn-dusk dependence: The absolute value of the Chinese geomagnetic index is greater than the global geomagnetic index when China is located on the dusk side, and is less when China is on the dawn side. Correspondingly, the number of Chinese geomagnetic disturbances is more than geomagnetic storms when China is located on the dusk side, and is less when China is on the dawn side. The physical mechanism of these phenomena is closely related to the dawn-dusk asymmetry of the ring current. Meanwhile, based on the Chinese geomagnetic index, the global geomagnetic index can be effectively obtained, and the results are in good agreement. Therefore, when the global geomagnetic index cannot be obtained, high-quality supplementary data can be provided.

**Key words** Chinese Meridian Project, *Dst* index, SYM-*H* index, Chinese *Dst* index, Chinese SYM-*H* index

## 0 引言

地球空间指地球周边的外层空间区域, 主要涵盖中高层大气、电离层与磁层. 该区域的物质主要来源于地球, 属于地球大气的延伸部分, 同时又受太阳辐射变化的直接影响. 地球空间环境并非稳定平静的区域, 自 19 世纪中叶起其变化便已对人类技术活动 (通信、导航等) 产生影响. 人们将空间环境中影响人类技术系统的过程与现象定义为空间天气, 对空间天气的监测和研究已成为全球空间科学领域的重点课题.

磁层是由若干非线性耦合子系统构成的复杂磁场电流系统[1], 其包裹地球并相互作用, 催生各类关联过程, 这些过程在广泛的空间尺度与时间尺度上均有体现[2–6]. 磁层中的一个重要电流系统是环电流, 其是环绕地球流动的西向环形电流, 由进入地球磁层内部的太阳质子与电子发生方位运动形成, 在磁层赤道平面上的延伸范围为 3～8 $R_e$ ($R_e$ 为地球半径) [7]. 由于其自身形状与流向, 环电流会产生南向磁场, 方向几乎与地球磁轴平行; 而在地球表面, 地球固有磁场方向向北, 环电流的感应磁场与地球固有磁场方向恰好相反, 因此地球表面实际观测到的磁场为地球固有磁场减去环电流感应磁场得到的差值. 当太阳风强度增强时, 更多粒子注入内磁层, 导致环电流强度增强, 随之增强的环电流磁场会更大程度地抵消地球固有磁场, 使地表磁场强度降低, 发生称为磁暴的现象. 磁暴会严重扰动地球电磁环境, 并可能引发广泛且重大的影响, 包括电信系统异常、卫星故障、电线及导电材料上感应出高压电流等[8].

为表征环电流引发的地球表面磁场轴对称扰动, 已经开发了多种地磁指数, 暴时扰动 (*Dst*) 指数是其中一个重要指数. *Dst* 指数的标准版本自 1957 年起开始计算, 由世界地磁数据中心 (WDC) 提供[9], 其物理意义为地球表面磁赤道处地磁场的经向平均分量, 单位通常为 nT. 该指数的计算基于 4 个长期运行的低纬度台站的地磁场水平分量小时分辨率数据, 这些台站包括 Hermanus(HER)[10], Kakioka(KAK)[11], Honolulu(HON) 及 San Juan(SJG)[12]. 这 4 个台站的选择具有明确科学依据: 一是受极光电集流与赤道电集流的干扰较小, 数据稳定性高; 二是经度分布比较均匀, 能有效覆盖全球低纬度区域. *Dst* 指数的计算流程为: 首先提取各台站以世界时 (UT) 小时底部 (例如 00:30 UT 和 01:30 UT) 为中心的地磁场水平分量小时均值; 三是从该均值中扣除太阳静日变化 ($S_q$), 得到各台站的地磁扰动时间序列; 最后对这些扰动序

列进行加权平均, 以对应 UT 小时为时间戳, 得到该时刻的 *Dst* 值.

*Dst* 指数是衡量地磁活动强度的关键指标, 可清晰反映磁暴的发生时间与强度. 在磁暴演变过程中, 环电流强度呈现“先增强、后减弱”的动态变化特征, 导致地磁场低纬水平分量同步出现“先降低、后升高”的现象; 对应地, *Dst* 指数也会从磁暴发生前的零值附近下降为负值, 然后在磁暴进入恢复相后再逐渐回升至零值左右[13]. 因此, *Dst* 指数作为环电流“先增强、后减弱”过程的直接表征[14,15], 能有效捕捉并量化磁暴的发生、发展及恢复全过程.

尽管 *Dst* 指数仅能描述磁暴复杂演变过程的部分特征[16–18], 但其仍是估算空间天气危害的重要指标. 由 *Dst* 指数下降所反映的环电流增强, 会驱动亚暴电流从环电流沿磁力线穿过电离层并返回环电流[19,20], 进而在固体地球中纬度区域感应出地电场, 最终诱发电网磁暴危害[21–25]; 与 *Dst* 指数突变相关的电离层干扰, 是超视距无线电通信及全球定位系统 (GPS) 信号暴时异常的主要诱因[26,27]; 此外, 影响低轨卫星轨道阻力的热层密度、可能损坏机载电子设备的航天器充电现象, 均与 *Dst* 值存在明确关联[19,28–30].

另一重要地磁指数为对称 *H* 分量 (SYM-*H*) 指数. 该指数与 *Dst* 指数的物理内涵基本一致, 核心差异在于将时间分辨率提升至 1 min, 其计算所用的地磁数据来源于 11 个台站[31–34], 具体包括 SJG, Fredericksburg(FRD), Boulder(BOU), Tucson (TUC), HON, Memambetsu(MMB), Urumqi (WMQ), Alibag(ABG), Martin de Vivies(AMS), HER 及 Chambon-la-Foret(CLF). SYM-*H* 指数的计算流程遵循严格的质量控制原则: 每月根据数据质量与连续性, 从 11 个台站中筛选出 6 个合格台站的观测数据; 先从原始数据中扣除 $S_q$ 以提取地磁扰动序列, 再对这些扰动序列进行加权平均, 最终得到 SYM-*H* 指数. 作为环电流强度的另一有效表征, SYM-*H* 指数同样可用于精准指示磁暴强度[7,35].

*Dst* 指数与 SYM-*H* 指数作为地磁活动的核心衡量指标, 虽能定量反映全球范围的地磁扰动变化, 但针对中国区域的刻画未必准确. 本研究利用子午工程部署于拉萨、成都、武汉、杭州四个台站的地磁数据, 计算得到中国区域 *Dst* 指数 (c*Dst* 指数) 与中国区域 SYM-*H* 指数 (cSYM-*H* 指数), 可更精准地描述中国区域的地磁扰动特征. 通过对比中国区域地磁指数与全球地磁指数, 发现二者存在明显差异. 当中国处于昏侧时, 中国区域地磁指数的绝对值大于全球地磁指数的绝对值; 当中国处于晨侧时, 则小于全球地磁指数的绝对值. 此外, 还可以利用中国区域地磁指数反演全球地磁指数, 反演结果与全球地磁指数符合很好, 表明中国区域地磁指数具备反演全球地磁指数的能力. 当全球地磁指数因观测故障、传输中断等原因无法获取时, 反演结果可作为其有效补充数据.

本文介绍了子午工程地磁数据的来源与特征, 基于该数据计算 c*Dst* 指数, 并利用 c*Dst* 指数反演 *Dst* 指数; 采用类似方法, 计算 cSYM-*H* 指数并反演 SYM-*H* 指数; 总结研究成果与结论.

## 1 数据介绍

子午工程一期沿东经 120°经线与北纬 30°纬线布局, 台站北起漠河, 经北京、武汉, 南至海南并延伸至南极中山站, 东起上海, 经武汉、成都, 西至拉萨, 共设 15 个监测台站, 构建形成“以链为主、链网结合”的大型空间环境地基监测系统. 该系统综合运用地磁(电)、无线电、光学及探空火箭等多种观测手段, 对地球表面 20～30 km 以上至数百公里乃至十几个地球半径外的地磁 (电) 场、中高层大气、电离层、磁层及行星际空间关键参数进行连续监测. 子午工程充分依托中国地域优势, 对获取气球与卫星难以探测的低电离层、热层区域环境数据, 掌握中国上空空间天气变化规律并开展预报, 具有重要科学意义与应用价值.

子午工程二期在一期的基础上, 沿东经 100°经线与北纬 40°纬线新建 16 个台站, 最终形成包括 31 个科学台站、92 个观测站点、282 台设备的两纵两横台网格局. 建设完成后的子午工程实现太阳–行星际–近地面全链路监测, 覆盖地磁、电离层、中高层大气全景布局, 针对极区高纬、北方中纬、海南低纬、青藏高原开展精细观测, 建成“一链、三网、四聚焦”的观测体系.

在地磁监测方面, 子午工程一期在 14 个站点部署磁通门磁力仪, 自 2010 年 7 月起持续获取地磁数据; 二期在 16 个新建站点新增磁通门磁力仪, 共同构成 30 个站点的地磁监测网. 磁通门磁力仪配备三个感应器, 探测地磁场三个方向的强度, 进而确定地磁场的大小与方向. 由于地磁场强度达数万纳特斯拉,

仪器通过在与地磁场相反方向施加补偿磁场, 抵消部分地磁强度, 仅测量地磁场的相对变化量, 而这正是空间天气学研究的核心关注对象. 其观测数据包括地磁场 $H$, $Z$, $D$ 三分量及温度 $T$, 时间分辨率为 1 s.

如表 1 所示, 选取子午工程拉萨、成都、武汉、杭州 4 个站点的地磁数据计算 *cDst* 指数和中国区域 SYM-$H$ 指数. 站点选取遵循三个依据: 一是远离极区与赤道, 避免赤道电集流、极区电集流的干扰; 二是经度分布均匀, 可基本覆盖中国区域; 三是数据质量高、连续性好. 研究基于 2010 年 7 月至 2024 年 10 月的地磁观测数据, 计算 c*Dst* 指数和 cSYM-$H$ 指数.

## 2 c*Dst* 指数

### 2.1 c*Dst* 指数的计算

借鉴 *Dst* 指数的计算方法构建 c*Dst* 指数, 研究时间跨度为 2010 年 7 月至 2024 年 10 月. 针对上述 4 个地磁观测站点, 分别将原始时间分辨率为 1 s 的地磁 $H$ 分量数据进行小时均值计算, 从而得到小时分辨率的地磁 $H$ 分量序列.

图 1 给出了 2024 年 5 月上述 4 个站点的地磁 $H$ 分量动态变化. 由图可出, 剔除各站点固有的系统偏差后, 4 个站点地磁 $H$ 分量变化曲线的形态基本一致, 这表明地磁场 $H$ 分量的时间演化特征与经度几乎无关, 验证了基于多站点数据构建 c*Dst* 指数的合理性.

对地磁 $H$ 分量进行平均 $S_{\mathrm{q}}$ 消除. 首先选出每月地磁活动最为平静的 5 天, 提取这些日期的地磁 $H$ 分量数据; 接着采用时序叠加法对筛选出的数据进行计算, 得到该月的平均 $S_q$; 最后将地磁 $H$ 分量与对应月份的平均 $S_q$ 进行差值运算, 即可得到如下反映地磁扰动程度的磁场扰动值:

**表 1 地磁站点的经纬度信息**

**Table 1 Longitude and latitude of observatories**

| 序号 | 站点 | 经度/ (°)E | 纬度/ (°)N | 地磁纬度/ (°)N |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 拉萨 | 91.11 | 29.64 | 20.54 |
| 2 | 成都 | 103.90 | 30.80 | 21.36 |
| 3 | 武汉 | 114.48 | 30.51 | 21.12 |
| 4 | 杭州 | 120.16 | 30.27 | 21.04 |

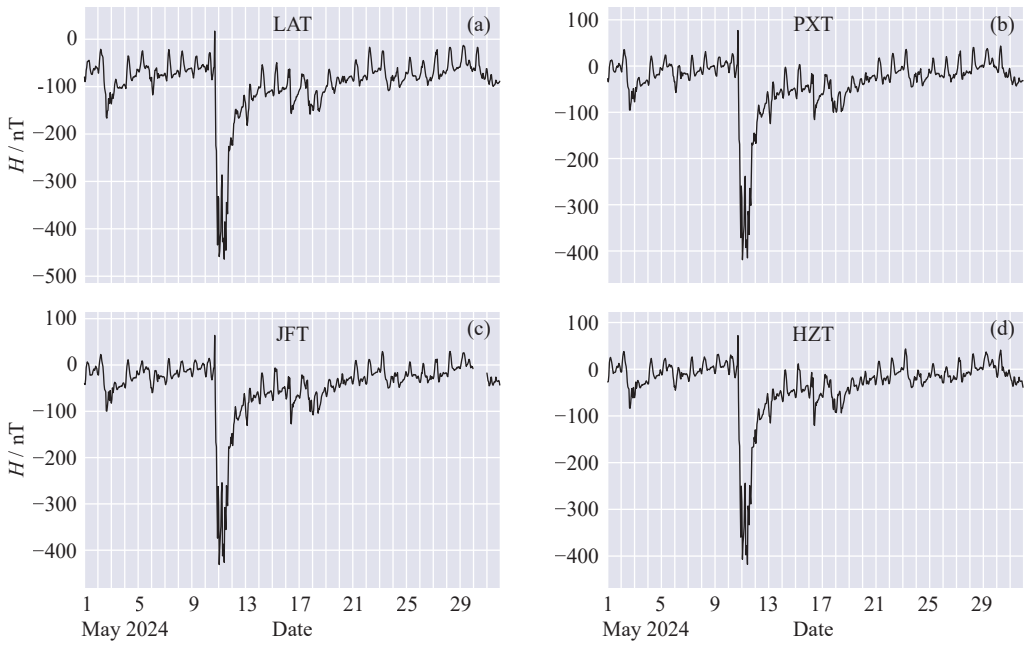



图 1 2024 年 5 月 4 个站点的地磁 $H$ 分量

Fig. 1 Geomagnetic $H$ component of 4 observatories in May 2024

$$\Delta H_i = H - S\mathrm{q}.$$

这样可以有效去除作为规律性背景信号的 $S_\mathrm{q}$, 为 c*Dst* 指数的精准计算奠定基础.

利用 4 个站点的磁场扰动值, 完成 c*Dst* 指数的计算. 首先, 计算 4 个站点磁场扰动值的算术平均值 (公式表示为$\Delta H = \sum \Delta H_i/4$, 其中$\Delta H_i$代表第 $i$ 个站点的磁场扰动值) 和 4 个站点地磁纬度余弦值的算术平均值 (公式表示为$c = \sum \cos\varphi_i/4$, 其中$\varphi_i$代表第 $i$ 个站点的地磁纬度). 然后, 利用上述计算得到的均值, 将磁场扰动值归算至赤道位置, 有

$$\mathrm{c}Dst = \frac{\Delta H}{c}.$$

得到的 c*Dst* 指数单位 nT.

基于上述方法, 研究计算获得了 2010 年 7 月至 2024 年 10 月期间的 c*Dst* 指数. 太阳活动自 2023 年起进入高年, 根据 c*Dst* 指数计算结果, 2024 年 5 月和 10 月各发生 1 次超大磁暴, 其 c*Dst* 指数均低于 –300 nT.

图 2 给出了这 2 次磁暴期间 c*Dst* 指数与 *Dst* 指数的时间变化对比, 其中深色曲线代表 c*Dst* 指数, 浅色曲线代表 *Dst* 指数, 红色虚线标出–200 nT 的位置, 蓝色虚线标出–100 nT 的位置. 由图可见, 在这 2 次磁暴发生期间, c*Dst* 指数和 *Dst* 指数出现相同的变化趋势, 但两者的具体数值存在明显差异.

表 2 给出了这 2 次磁暴的差异特征, 对于 2024 年 5 月的磁暴, 在磁暴主相阶段, 中国处于昏侧, 此时 c*Dst* 指数的极值 (c$Dst_\mathrm{m}$) 小于 *Dst* 指数的极值 ($Dst_\mathrm{m}$); 而在 2024 年 10 月的磁暴主相阶段, 中国处于晨侧, 对应的 c$Dst_\mathrm{m}$ 则大于 $Dst_\mathrm{m}$, 不过二者的数值差异较小.

### 2.2 利用 c*Dst* 指数反演 *Dst* 指数

为了深入分析 c*Dst* 指数与 *Dst* 指数的差异特征, 从 2010 年 7 月至 2024 年 10 月的 c*Dst* 指数数据中, 筛选出 c*Dst* < –30 nT 的时段 (旨在关注磁暴期间的

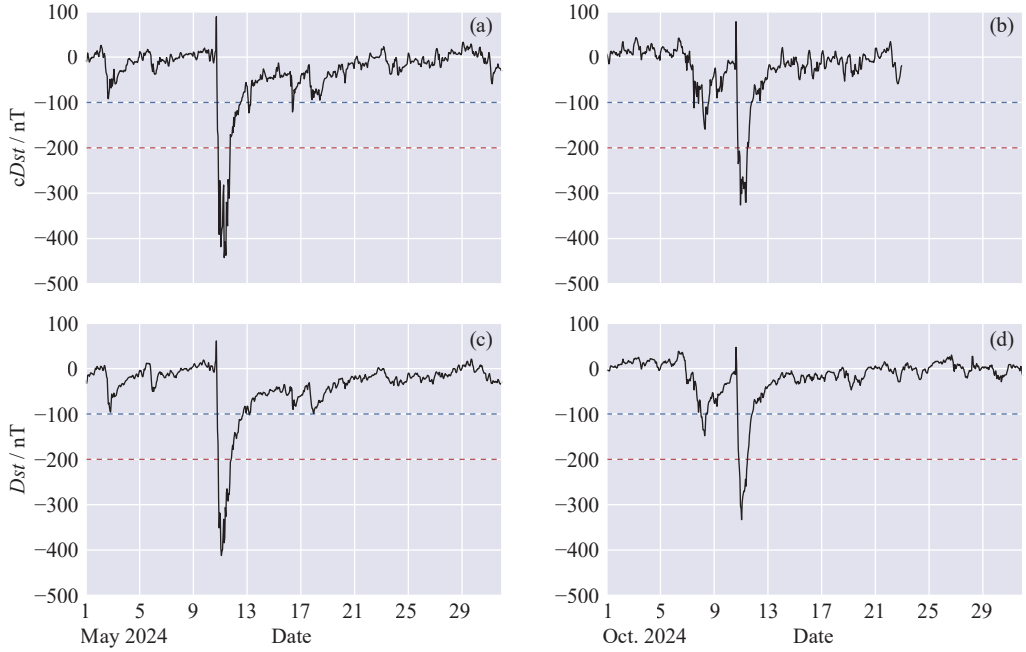



图 2 2024 年 5 月和 10 月磁暴期间 c*Dst* 指数和 *Dst* 指数的对比

Fig. 2 Comparison of c*Dst* index and *Dst* index during storms in May (a) and October (b) of 2024

**表 2 2024 年 5 月和 10 月磁暴的 c*Dst* 和 *Dst* 极值**

**Table 2 Minimum values of c*Dst* and *Dst* of storms in May and October of 2024**

| 序号 | 日期 | 时间 | 中国 | c*Dst*/nT | *Dst*/nT | c*Dst*/*Dst* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2024-05-11 | 07:00 UT | 昏侧 | –442 | –412 | 1.07 |
| 2 | 2024-10-10 | 23:00 UT | 晨侧 | –326 | –333 | 0.97 |

指数变化), 提取对应时段的 c*Dst* 指数与 *Dst* 指数, 按小时进行均值计算, 然后计算 c*Dst* 指数均值与 *Dst* 指数均值的比值 (即 c*Dst*/*Dst*).

图 3(a) 给出了 c*Dst* ⩽ –50 nT(对应 2 级及以上磁暴, 对空间环境具有显著影响, 为重点研究对象) 时的比值特征, 图 3(b) 给出了–50 nT < c*Dst* ⩽ –30 nT 时的比值特征. 从图 3 可清楚看出比值的时间分布规律: 03:00—17:00 UT 期间, 中国处于昏侧, 比值 (c*Dst*/*Dst*) 大于 1, 即 c*Dst* 指数的绝对值更大, 由于磁暴期间 c*Dst* 与 *Dst* 均为负值, 表明 c*Dst* < *Dst*. 在 12:00 UT 比值达到峰值, 二者差异最为显著. 18:00—次日 02:00 UT 期间, 中国处于晨侧, 比值 (c*Dst*/*Dst*) 则小于 1, 即 c*Dst* 指数的绝对值更小, 表明 c*Dst* > *Dst*.

上述现象的物理机制与环电流的晨昏不对称性密切相关. 环电流主要在地球夜侧形成, 随后沿特定路径向西旋转漂移, 在其漂移过程中首先抵达昏侧区域, 然后经日侧漂移到晨侧, 仅有部分带电离子能够传输至晨侧, 这就导致环电流在昏侧的强度显著大于晨侧[36]. 这一电流分布差异直接造成了 c*Dst* 指数的时空特征——昏侧因环电流较强, 地磁扰动强度大于全球平均水平, 所以中国位于昏侧时的 c*Dst* 指数小于 *Dst* 指数; 晨侧因环电流较弱, 地磁扰动程度小于

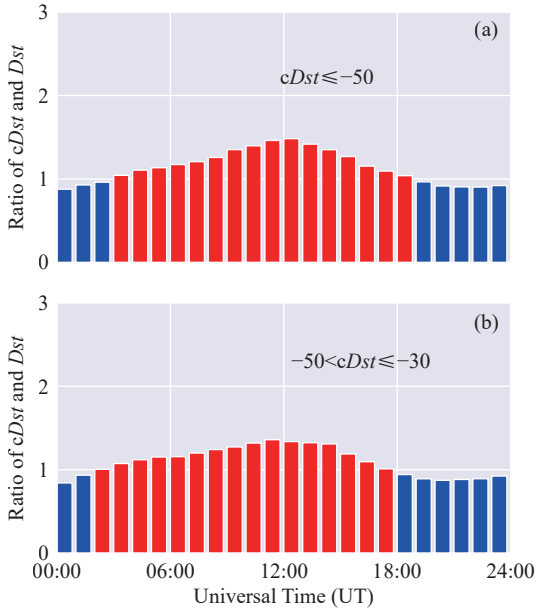



图 3 c*Dst* 和 *Dst* 的比值随 UT 的分布

Fig. 3 Distribution of the ratio of c*Dst* to *Dst* with UT

全球平均水平, 所以中国位于晨侧时的 c*Dst* 指数大于 *Dst* 指数.

因为 *Dst* 指数反映了磁暴的整体剧烈程度, 所以可进一步推断: 当中国处于昏侧时, 中国区域地磁扰动剧烈程度高于磁暴强度; 而当中国处于晨侧时, 中国区域实际地磁扰动剧烈程度则低于磁暴强度. 这一结论为精准评估磁暴对中国区域空间环境的影响提供了关键依据.

由此可见, *Dst* 指数作为反映全球地磁活动平均水平的指标, 无法精确描述中国区域地磁扰动情况. 相比之下, c*Dst* 指数能更有针对性地描述中国区域的地磁活动特征, 更贴合中国区域空间环境研究与应用需求. 同时, c*Dst* 指数还具备反演 *Dst* 指数的实用价值, 当因设备故障、传输中断等原因导致 *Dst* 指数无法直接获取时, 通过 c*Dst* 指数反演得到的 *Dst* 指数 (f*Dst*) 结果, 可以作为关键补充数据支撑相关研究和应用.

结合前文分析可知, c*Dst* 指数与 *Dst* 指数的比值 (c*Dst*/*Dst*) 会随 UT 发生规律性变化, 中国处于昏侧时大于 1, 处于晨侧时小于 1. 为了反映这个变化, 将 c*Dst* 与 *Dst* 的匹配数据按 UT 划分为 24 组 (即每小时为一个独立分组), 对每组数据分别构建 c*Dst* 与 *Dst* 的拟合关系. 此外, 考虑到中国区域地磁扰动的定义标准为 c*Dst* < –30 nT, 为使拟合模型更贴合实际扰动场景, 对每组数据进一步以 c*Dst* = –30 nT 为界进行分段拟合. 最终得到 c*Dst* 指数与 *Dst* 指数的定量关系式如下, 各分段拟合关系式的系数具体数值如表 3 所示.

$$Dst=\begin{cases}a_1\times(\mathrm{c}Dst+30)+b, \mathrm{c}Dst\leqslant -30;\\ a_2\times(\mathrm{c}Dst+30)+b, \mathrm{c}Dst>-30.\end{cases}$$

根据表 3 可以看出, 04:00—18:00 UT, $a_1<1$, 表明此时 c*Dst* 指数每变化 1, *Dst* 指数的变化小于 1; 19:00—03:00 UT, $a_1>1$, 表明此时刻 c*Dst* 指数每变化 1, *Dst* 指数的变化大于 1. 图 4 给出了 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UT 四个时刻 c*Dst* 指数与 *Dst* 指数的线性关系, 从图中也可直观观察到, 不同 UT 对应的线性拟合曲线斜率 (即 *Dst* 指数随 c*Dst* 指数的变化率) 存在明显差异. 这一差异进一步印证了前文所述 c*Dst* 与 *Dst* 指数关系的 UT 依赖性, 也为不同时刻通过 c*Dst* 指数反演 *Dst* 指数提供了直观的线性关系参考.

**表 3　*Dst* 与 c*Dst* 线性关系的系数**

**Table 3　Parameters of the linear relationship between *Dst* and c*Dst***

| UT | $a_1$ | $a_2$ | $b$ |
|---|---|---|---|
| 00:00 | 1.238 | 0.848 | –31.843 |
| 01:00 | 1.170 | 0.777 | –29.533 |
| 02:00 | 1.120 | 0.713 | –27.305 |
| 03:00 | 1.002 | 0.666 | –25.677 |
| 04:00 | 0.926 | 0.639 | –24.690 |
| 05:00 | 0.881 | 0.644 | –24.452 |
| 06:00 | 0.854 | 0.670 | –24.775 |
| 07:00 | 0.804 | 0.694 | –24.922 |
| 08:00 | 0.737 | 0.725 | –24.983 |
| 09:00 | 0.662 | 0.744 | –24.659 |
| 10:00 | 0.640 | 0.759 | –24.500 |
| 11:00 | 0.599 | 0.766 | –24.123 |
| 12:00 | 0.572 | 0.785 | –24.314 |
| 13:00 | 0.597 | 0.803 | –24.757 |
| 14:00 | 0.622 | 0.823 | –25.491 |
| 15:00 | 0.669 | 0.871 | –27.232 |
| 16:00 | 0.741 | 0.930 | –29.281 |
| 17:00 | 0.798 | 0.981 | –31.037 |
| 18:00 | 0.926 | 1.004 | –31.966 |
| 19:00 | 1.035 | 1.044 | –33.270 |
| 20:00 | 1.201 | 1.057 | –33.559 |
| 21:00 | 1.223 | 1.052 | –33.424 |
| 22:00 | 1.247 | 1.026 | –32.450 |
| 23:00 | 1.285 | 0.954 | –30.164 |

图 5 给出了前文所述的 2 次超大磁暴 (2024 年 5 月和 2024 年 10 月) 期间, c*Dst* 指数、*Dst* 指数和 f*Dst* 的时间变化. 其中图 5(a)(b) 单独给出 c*Dst* 指数的动态演化; 图 5(c)(d) 中, 深色曲线代表实测 *Dst* 指数, 浅色曲线代表反演得到的 f*Dst* 值, 图中红色虚线标注–200 nT 的位置, 蓝色虚线标注–100 nT 的位置. 由图可清晰观察到, 在这 2 次磁暴期间, 反演得到的 f*Dst* 值与实测 *Dst* 指数的变化趋势高度一致, 整体吻合度良好, 尤其在磁暴主相 (指数快速下降阶段) 与恢复相 (指数缓慢回升阶段), 二者的时间同步性与数值贴近度均表现优异.

表 4 进一步量化了 2 次磁暴的差异特征, 数据显示 f*Dst* 值与实测 *Dst* 指数在 2 次磁暴期间均同步达到极值 (即二者同时达到各自的极小值 f$Dst_{\rm m}$ 与 $Dst_{\rm m}$). 具体来看, 2024 年 5 月磁暴期间, f$Dst_{\rm m}$ 与 $Dst_{\rm m}$ 均小于–400 nT, 属于极强磁暴; 2024 年 10 月磁暴期间, f$Dst_{\rm m}$ 与 $Dst_{\rm m}$ 均小于–300 nT, 虽强度略弱于 5 月磁暴, 但仍为超大磁暴. 值得注意的是, 2 次磁暴中 f$Dst_{\rm m}$ 均比同期 $Dst_{\rm m}$ 偏小几十 nT, 这一细微差异表明反演得到的 f$Dst_{\rm m}$ 略低于实测 $Dst_{\rm m}$ 的数值.

从统计层面验证, 在本研究 2010 年 7 月至 2024 年 10 月的数据范围内, 反演得到的 f*Dst* 值与实测 *Dst* 指数的相关系数高达 0.884, 且均方根误差仅为 7.470 nT. 这两个关键统计指标充分表明, 基于 c*Dst* 指数反演 *Dst* 指数的方法具备优异的可靠性与准确性, 能够在实测 *Dst* 指数缺失时提供高质量的补充数据.

### 2.3　磁暴数量随时间与等级的分布

参照全球通用标准 (以 *Dst* 指数 $< -50$ nT 定义 2 级及以上磁暴), 将 c*Dst* $< -50$ nT 的指数定义为 2 级及以上中国区域磁扰. 基于该定义, 从 2010 年 7 月至 2024 年 10 月的 14 年数据序列中, 分别筛选出所有 2 级及以上中国区域磁扰 (满足 c*Dst* $< -50$ nT) 和所有 2 级及以上磁暴 (满足 *Dst* $< -50$ nT).

图 6(a)(b) 分别给出了中国区域磁扰和磁暴的时间分布特征, 可清晰观察到两者显著的时空差异规律. 2 级及以上中国区域磁扰并非随机分布, 而是集中于 04:00－15:00 UT 时段——该时段中国处于昏侧, 且在 11:00 UT 达到发生频次的峰值. 与中国区域磁扰不同, 2 级及以上磁暴的发生数量随 UT 的分布相对均匀, 未表现出明显的时段聚集特征, 体现了全球尺度地磁活动的广泛性与随机性.

进一步对比两类事件的数量关系可发现, 当中国处于昏侧 (04:00－15:00 UT) 时, 中国区域磁扰的数量显著多于同期磁暴数量; 而当中国处于晨侧 (16:00－次日 03:00 UT) 时, 中国区域磁扰数量则明显少于同期磁暴数量. 这一统计结果与前文通过指数比值分析得出的结论完全契合, 从事件频次角度进一步印证了核心规律. 中国位于昏侧时中国区域地磁扰动的剧烈程度高于全球平均水平, 位于晨侧时中国区域地磁扰动的剧烈程度则低于全球平均水平.

图 6(c) 给出了利用 f*Dst* 所识别的全球范围内 2 级及以上磁暴 (判定标准为 f*Dst* $< -50$ nT) 的时间分布特征. 从分布形态来看, 通过 f*Dst* 值判定的磁暴,

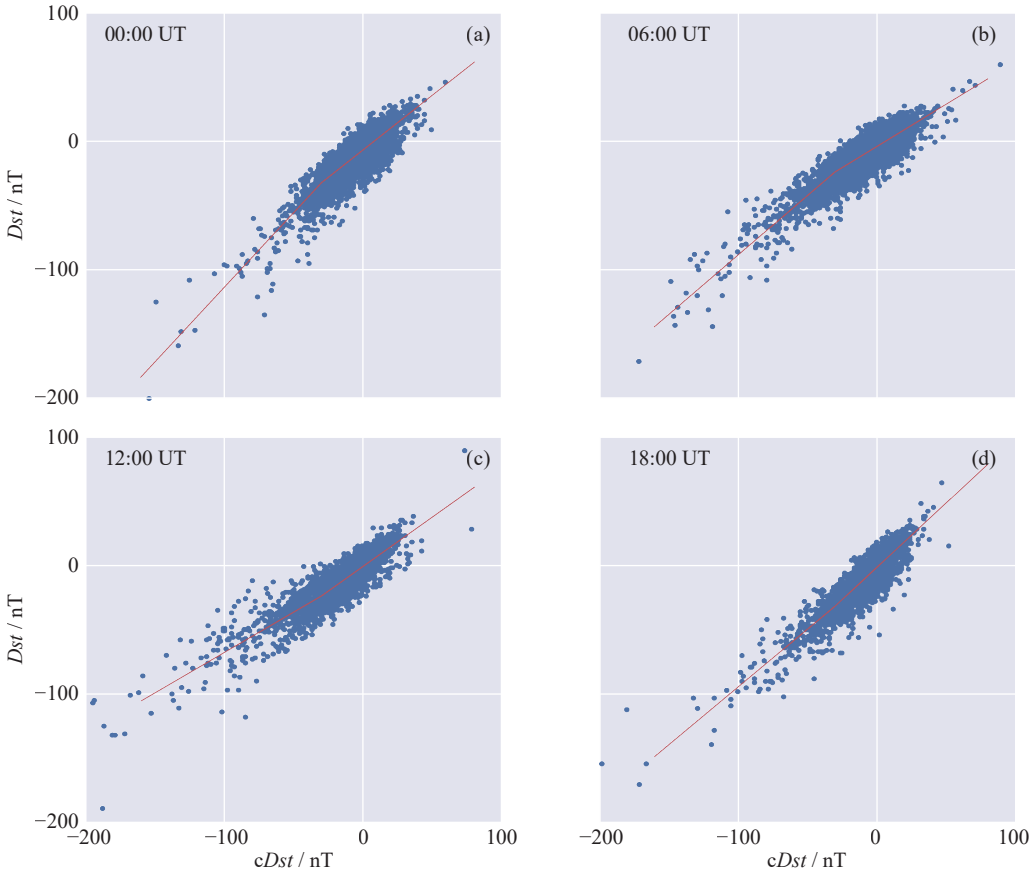



图 4 *Dst* 指数随 c*Dst* 指数的变化关系

Fig. 4 Relationship between *Dst* index and c*Dst* index

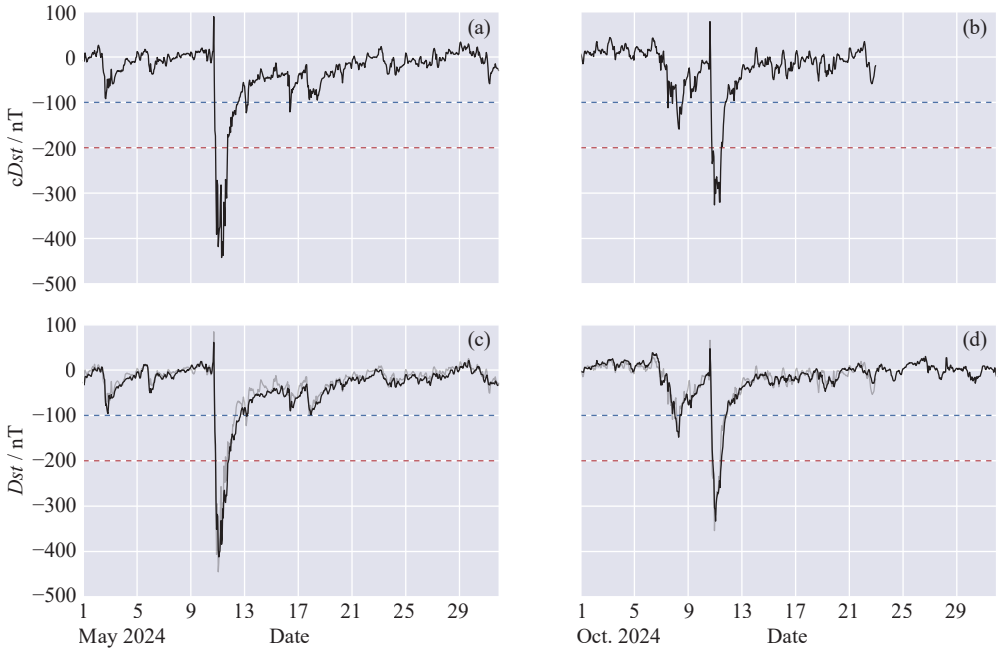



图 5 2024 年 5 月和 10 月磁暴期间 c*Dst* 指数和 *Dst* 指数与 f*Dst* 值的对比

Fig. 5 Comparison of c*Dst* index, *Dst* index, and f*Dst* values during storms in May and October of 2024

表 4 2024 年 5 月和 10 月磁暴的 f*Dst* 和 *Dst* 极值

Table 4 Minimum values of f*Dst* and *Dst* of storms in May and October of 2024

| 序号 | 日期 | 时间 | 中国 | f*Dst*/nT | *Dst*/nT |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2024-05-11 | 02:00 UT | 晨侧 | –445 | –412 |
| 2 | 2024-10-11 | 01:00 UT | 晨侧 | –354 | –333 |

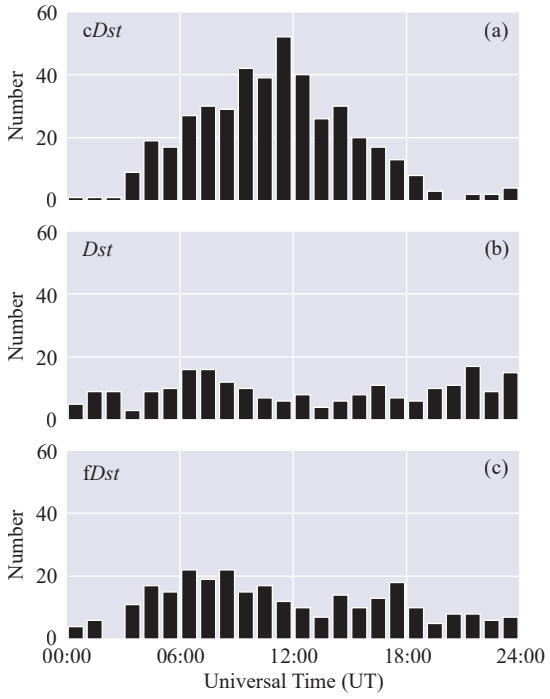



图 6 中国区域磁扰数量 (a)、磁暴数量 (b) 和 f*Dst* 值判断得到的磁暴数量 (c) 随世界时的分布

Fig. 6 Distribution of the number of Chinese geomagnetic disturbances (a), storms (b), and storms determined by f*Dst* values (c) with UT

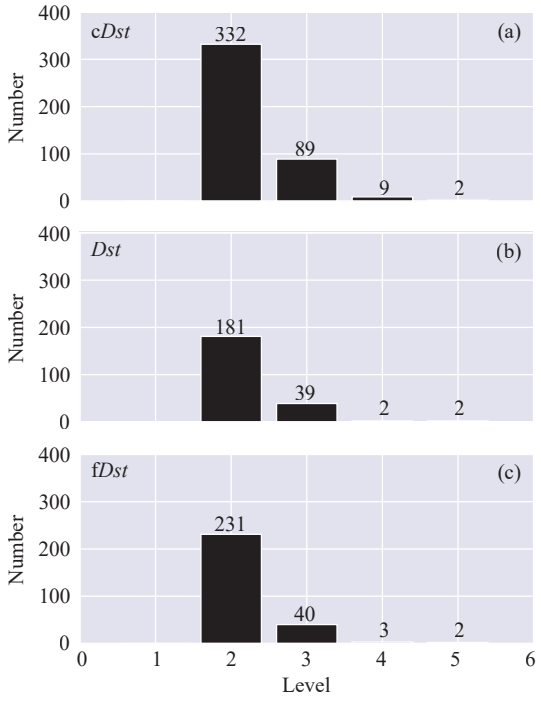



图 7 中国区域磁扰数量 (a)、磁暴数量 (b) 和 f*Dst* 值判断得到的磁暴数量 (c) 随等级的分布

Fig. 7 Distribution of the number of Chinese geomagnetic disturbances (a), storms (b), and storms determined by f*Dst* values (c) with level

其数量随 UT 的变化趋势与通过实测 *Dst* 指数判定的磁暴分布比较相近, 二者均未表现出明显的时段聚集性, 整体分布较为均匀.

图 7(a)(b) 分别给出了 2 级及以上中国区域磁扰与 2 级及以上磁暴的等级分布对比 (按磁扰/磁暴强度等级划分). 从图中数据分布可见, 在每个强度等级下, 中国区域磁扰的发生数量均多于磁暴的发生数量. 所以, 尽管在中国处于晨侧时, 中国区域磁扰数量会少于磁暴数量, 但从 14 年数据的整体统计维度来看, 由于中国处于昏侧时磁扰事件的高发性, 最终使得中国区域磁扰的总数量显著多于磁暴的总数量.

据此推断, *Dst* 指数作为反映全球地磁活动平均水平的指标, 其定义的磁暴无法完全覆盖中国区域地磁扰动情况. 若仅以 *Dst* 指数 (及对应的磁暴标准) 作为中国区域地磁扰动的预测依据, 会因未能充分捕捉中国区域特有的地磁扰动特征 (尤其是中国处于昏侧时的扰动), 而出现磁扰事件漏报的现象, 这也再次凸显了 c*Dst* 指数对中国区域地磁活动监测的必要性与重要性.

图 7(c) 给出了利用 f*Dst* 所识别的 2 级及以上磁暴 (判定标准为 f*Dst* $<$ –50 nT) 的等级分布特征. 从各强度等级的事件数量分布来看, 通过 f*Dst* 值判定的磁暴数量与通过实测 *Dst* 指数判定的磁暴数量呈现出比较相似的分布规律, 在不同强度等级下, 二者的数量差异较小, 等级分布趋势基本一致, 进一步体现了反演结果与实测数据的契合度.

结合图 6(时间分布) 与图 7(等级分布) 的双重验证结果, 可进一步证实 f*Dst* 的可靠性与准确性. 一方面, 反演得到的 f*Dst* 不仅能在数值层面与实测 *Dst* 保持较高一致性 (前文已通过相关系数与均方根误差验证), 还能精准复现全球磁暴事件时间分布均匀的核心特征, 同时准确匹配不同强度等级磁暴的数量分布规律; 另一方面, 这一结果也明确说明, 当实测 *Dst* 指数因观测故障、传输中断等原因无法获取时, 通过该方法反演得到的 f*Dst* 值可作为高质量补充数据, 有效支撑全球地磁活动监测、磁暴事件识别与统计等相关研究工作.

## 3 cSYM-*H* 指数

### 3.1 cSYM-*H* 指数的计算

c*Dst* 指数的时间分辨率为 1 h, 难以精准刻画地磁场的快速变化. 为此, 借鉴 SYM-*H* 指数的定义, 构建 cSYM-*H* 指数, 将时间分辨率提升至 1 min. cSYM-*H* 指数的计算流程与前文所述 c*Dst* 指数类似, 具体过程简述如下.

针对上述 4 个地磁观测站点, 分别对原始时间分辨率为 1 s 的地磁 *H* 分量数据进行分钟均值计算, 得到时间分辨率为 1 min 的地磁 *H* 分量序列. 图 8 给出了 2024 年 5 月 4 个站点的地磁 *H* 分量时间变化特征, 其时间分辨率为 1 min.

对分钟分辨率的地磁 *H* 分量进行平均 $S_q$ 消除处理. 筛选出每月地磁活动最平静的 5 天, 提取这些日期的地磁 *H* 分量数据. 采用时序叠加法对筛选出的数据进行计算, 得到该月的平均 $S_{\mathrm{q}}$. 将原始地磁 *H* 分量与对应月份的平均 $S_q$ 进行差值运算, 可以得到反映地磁扰动程度的磁场扰动值, 即

$$\Delta H_i = H - S\mathrm{q}.$$

基于 4 个站点的磁场扰动值$\Delta H_i$, 完成 cSYM-*H* 指数的计算. 分别计算 4 个站点磁场扰动值的算术平均值$\Delta H$和 4 个站点地磁纬度余弦值的算术平均值 *c*. 利用上述两项均值将区域磁场扰动值归算至赤道参考位置, 即

$$\text{cSYM-}H = \Delta H/c.$$

得到的归算结果 cSYM-*H* 指数单位为 nT.

基于上述方法, 计算获得了 2010 年 7 月至 2024 年 10 月期间的 cSYM-*H* 指数. 图 9 给出了 2024 年发生的 2 次磁暴期间, cSYM-*H* 指数与 SYM-*H* 指数的时间变化对比, 其中深色曲线代表 cSYM-*H* 指数, 浅色曲线代表 SYM-*H* 指数, 红色虚线标识 –200 nT, 蓝色虚线标识–100 nT. 由图可见, 在这 2 次磁暴发生期间, 虽然 cSYM-*H* 指数和 SYM-*H* 指

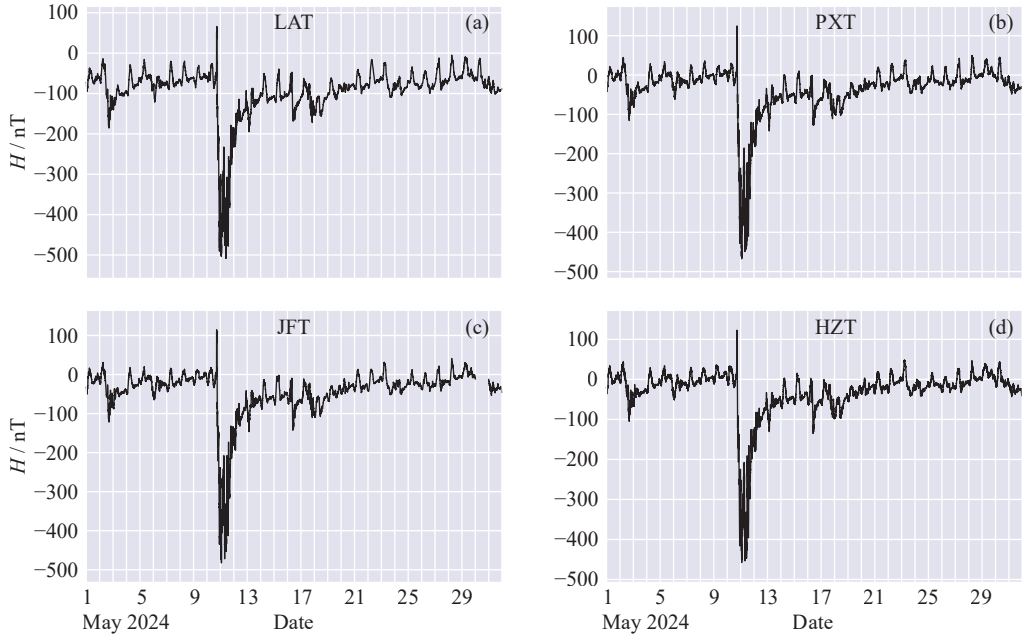



图 8 2024 年 5 月 4 个站点的地磁 *H* 分量

Fig. 8 Geomagnetic *H* component of 4 observatories in May 2024

数同步出现显著下降趋势, 但 cSYM-$H$ 指数与 SYM-$H$ 指数的具体数值始终存在明显差异, 体现出中国区域地磁扰动与全球平均水平的区别.

表 5 给出了 2024 年两次磁暴的基本信息, 2024 年 5 月磁暴的主相阶段, 中国区域处于昏侧; 2024 年 10 月磁暴的主相阶段, 中国区域则处于晨侧. 尽管两次磁暴主相阶段中国所处的地磁晨昏侧不同, 但两次事件中 cSYM-$H$ 指数的极值 (cSYM-$H_{\rm m}$) 均大于 SYM-$H$ 指数的极值 (SYM-$H_{\rm m}$).

### 3.2 利用 cSYM-$H$ 指数反演 SYM-$H$ 指数

为深入分析 cSYM-$H$ 指数与 SYM-$H$ 指数的差异特征, 从 2010 年 7—10 月的 cSYM-$H$ 指数数据序列中, 筛选出 cSYM-$H$ < –30 nT 的时段, 并提取这些时段的 cSYM-$H$ 指数与 SYM-$H$ 指数. 对这两类指数数据, 先按小时分别计算均值, 再计算 cSYM-H 指数小时均值与 SYM-$H$ 指数小时均值的比值 (即 cSYM-$H$/SYM-$H$), 以此量化二者的差异关系.

图 10 展示了比值 (cSYM-$H$/SYM-$H$) 的时间分布特征, 图 10(a) 对应 cSYM-$H$ ⩽ –50 nT, 图 10(b) 对应–50 nT<cSYM-$H$⩽–30 nT. 可以清楚看出比值随 UT 的变化规律: 03:00—18:00 UT 期间, 中国主要处于昏侧, 比值始终大于 1, 即 cSYM-$H$ < SYM-$H$, 且在 12:00 UT 比值达到峰值, 二者差异最为显著. 19:00 至次日 02:00 UT 期间, 中国区域处于晨侧, 比值则小于 1, 即 cSYM-$H$ > SYM-$H$. cSYM-$H$/SYM-$H$ 比值的时间分布特征, 与前文所述 c$Dst$/$Dst$ 比值的变化规律高度相似, 其原因来自环电流的晨昏不对称性.

因为 SYM-$H$ 指数反映的是磁暴过程中的全球地磁扰动剧烈程度, 所以可以推断, 当中国处于昏侧时, 中国地磁扰动剧烈程度高于磁暴强度; 当中国处于晨侧时, 中国地磁扰动剧烈程度则低于磁暴强度. 这一结论与基于 c$Dst$ 指数得出的规律一致, 为精准评估磁暴对中国区域空间环境、航天器运行及地面技术系

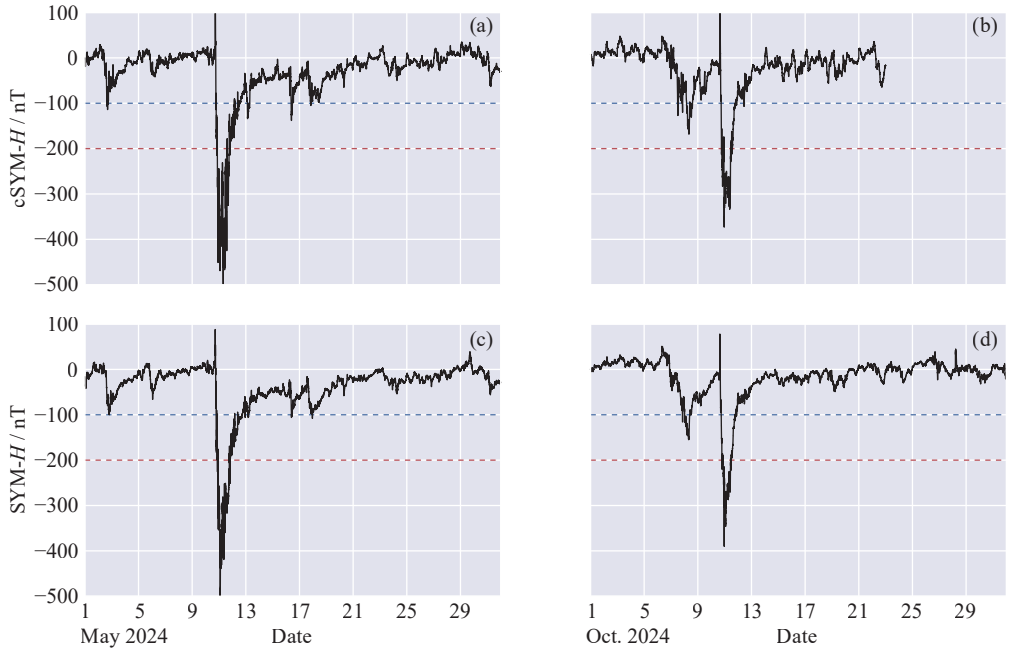



图 9 2024 年 5 月和 10 月磁暴期间 cSYM-$H$ 指数和 SYM-$H$ 指数的对比

Fig. 9 Comparison of cSYM-$H$ index and SYM-H index during storms in May and October of 2024

**表 5 2024 年 5 月和 10 月磁暴的 cSYM-$H$ 和 SYM-$H$ 极值**

**Table 5 Minimum values of cSYM-$H$ and SYM-$H$ of storms in May and October of 2024**

| 序号 | 日期 | 时间 | 中国 | cSYM-$H$ | SYM-$H$ | cSYM-$H$/SYM-$H$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2024-05-11 | 07:37 UT | 昏侧 | –499 | –518 | 0.96 |
| 2 | 2024-10-10 | 23:12 UT | 晨侧 | –373 | –390 | 0.96 |

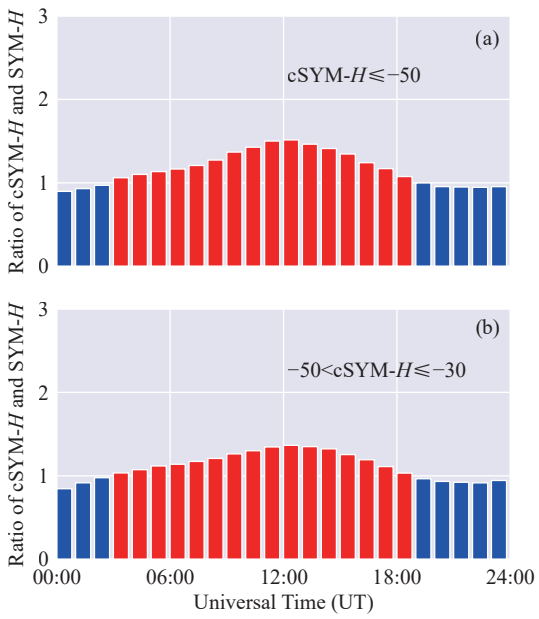



图 10 cSYM-$H$ 和 SYM-$H$ 的比值随 UT 的分布

Fig. 10 Distribution of the ratio of cSYM-$H$ to SYM-$H$ with UT

统的影响, 提供了关键的区域化依据.

相比于 SYM-$H$ 指数, cSYM-$H$ 指数能更精准、更具针对性地刻画中国区域的地磁活动特征. 同时, cSYM-$H$ 指数还可以用来反演 SYM-$H$ 指数, 当 SYM-H 指数因设备故障、传输中断等原因无法获取时, 通过 cSYM-$H$ 指数反演得到的 SYM-$H$ 结果, 可作为关键补充数据, 有效支撑地磁、磁暴相关的研究与应用.

参考 c$Dst$ 指数反演 $Dst$ 指数的方法, 将 cSYM-$H$ 与 SYM-$H$ 的匹配数据按 UT 划分为 24 组, 对每组数据分别构建 cSYM-$H$ 与 SYM-$H$ 的拟合关系. 同时, 结合中国区域地磁扰动的判断标准, 对每组数据以 cSYM-$H$ = −30 nT 为分界点进行分段拟合, 最终得到 SYM-$H$ 指数与 cSYM-$H$ 指数如下定量关系式:

$$\text{SYM-}H = \begin{cases} a_1 \times (\text{cSYM-}H + 30) + b, & \text{cSYM} - H \leqslant -30, \\ a_2 \times (\text{cSYM-}H + 30) + b, & \text{cSYM} - H > -30. \end{cases}$$

各分段拟合关系式对应的系数具体数值详见表 6.

根据表 6 可以看出: 04:00−22:00 UT, $a_1 < 1$, 表明此时 cSYM-$H$ 指数每变化 1, SYM-$H$ 指数的变化小于 1; 23:00−03:00 UT, $a_1 > 1$, 表明此时刻 cSYM-H 指数每变化 1, SYM-$H$ 指数的变化大于 1. 图 11 呈现了 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UT 四个时刻, SYM-$H$ 指数与 cSYM-$H$ 指数的线性拟合关系. 从图中可直观观察到, 不同 UT 对应的线性拟合曲线斜率存在显著差异. 斜率随 UT 的变化特征, 进一步印证了前文所述 cSYM-$H$ 指数与 SYM-$H$ 指数比值关系的 UT 依赖性, 体现出二者关联的时间动态性.

图 12 给出了前文所述 2 次超大磁暴 (2024 年 5 月和 2024 年 10 月) 期间, cSYM-$H$ 指数、SYM-$H$ 指数及通过 cSYM-$H$ 反演得到的 SYM-$H$ 指数 (fSYM-$H$) 的时间变化对比. 其中, 图 12(a)(b) 单独给出了 cSYM-$H$ 指数的时间变化; 图 12(c)(d) 中深

**表 6 SYM-$H$ 和 cSYM-$H$ 线性关系的系数**

**Table 6 Parameters of the linear relationship between SYM-$H$ and cSYM-$H$**

| UT | $a_1$ | $a_2$ | $b$ |
|---|---|---|---|
| 00:00 | 1.100 | 0.859 | −32.787 |
| 01:00 | 1.035 | 0.791 | −30.851 |
| 02:00 | 1.089 | 0.713 | −28.328 |
| 03:00 | 1.020 | 0.664 | −26.452 |
| 04:00 | 0.983 | 0.639 | −25.523 |
| 05:00 | 0.935 | 0.641 | −25.251 |
| 06:00 | 0.897 | 0.668 | −25.424 |
| 07:00 | 0.838 | 0.686 | −25.375 |
| 08:00 | 0.761 | 0.712 | −25.428 |
| 09:00 | 0.681 | 0.724 | −25.087 |
| 10:00 | 0.662 | 0.725 | −24.442 |
| 11:00 | 0.620 | 0.728 | −24.066 |
| 12:00 | 0.604 | 0.735 | −24.062 |
| 13:00 | 0.639 | 0.739 | −23.967 |
| 14:00 | 0.668 | 0.754 | −24.253 |
| 15:00 | 0.708 | 0.774 | −24.971 |
| 16:00 | 0.765 | 0.818 | −26.211 |
| 17:00 | 0.830 | 0.856 | −27.468 |
| 18:00 | 0.895 | 0.902 | −29.252 |
| 19:00 | 0.960 | 0.955 | −30.970 |
| 20:00 | 0.999 | 0.995 | −32.112 |
| 21:00 | 0.969 | 1.012 | −32.634 |
| 22:00 | 0.938 | 1.004 | −32.250 |
| 23:00 | 1.042 | 0.936 | −30.137 |

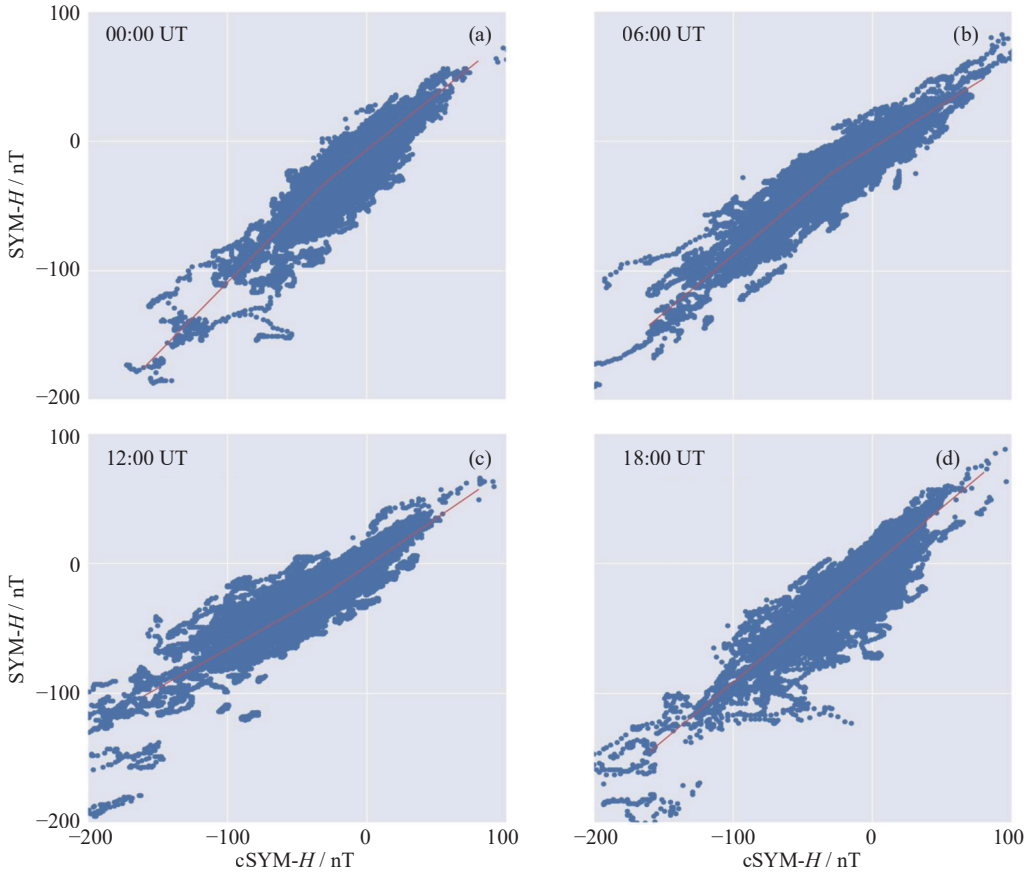



图 11　SYM-H 指数随 cSYM-$H$ 指数的变化关系

Fig. 11　Relationship between SYM-$H$ index and cSYM-$H$ index

色曲线代表实测 SYM-H 指数, 浅色曲线代表 fSYM-$H$ 值, 图内红色虚线标注–200 nT, 蓝色虚线标注–100 nT. 由图可清晰观察到, 在这 2 次磁暴的整个过程中, fSYM-$H$ 值与实测 SYM-$H$ 指数的变化趋势高度一致, 整体吻合度良好, 尤其在磁暴主相与恢复相, 二者的时间同步性与数值贴近度均表现得尤为优异.

表 7 进一步量化了 2 次磁暴的关键特征. fSYM-$H$ 值与实测 SYM-$H$ 指数在两次磁暴期间均同步达到极值, 体现出反演结果与实测数据在时间维度上的高度一致性. 具体来看, 2024 年 5 月磁暴期间, fSYM-$H$ 的极值 (fSYM-$H_{\mathrm{m}}$) 与 SYM-H 的极值 (SYM-$H_{\mathrm{m}}$) 均小于–400 nT, 达到极强磁暴级别; 2024 年 10 月磁暴期间, fSYM- $H_{\mathrm{m}}$ 与 SYM- $H_{\mathrm{m}}$ 均小于–300 nT, 对应超大磁暴级别. 值得注意的是, 两次磁暴事件中, fSYM- $H_{\mathrm{m}}$ 均略大于同期 SYM- $H_{\mathrm{m}}$, 与前文所述 f$Dst$ 小于实测 $Dst$ 指数的情况恰好相反.

在本文 2010 年 7 月至 2024 年 10 月的研究数据范围内, 反演得到的 fSYM-$H$ 值与实测 SYM-$H$ 指数的相关系数高达 0.906, 均方根误差仅为 7.358 nT. 这两项关键统计指标充分证实, 基于 cSYM-$H$ 指数反演得到的 SYM-$H$ 指数具备优异的可靠性与准确性, 当实测 SYM-$H$ 指数数据缺失时, 反演得到的 fSYM-$H$ 值可作为高质量补充数据, 有效支撑相关研究与应用.

### 3.3　磁暴数量随时间及等级的分布

为进一步对比 cSYM-$H$ 指数与 SYM-H 指数的磁暴识别差异, 从 2010 年 7 月至 2024 年 10 月的 14 年连续数据序列中, 分别筛选出所有 2 级及以上中国区域磁扰 (cSYM-$H$ < –50 nT) 和所有 2 级及以上磁暴 (SYM-$H$ < –50 nT).

图 13(a)(b) 分别给出了中国区域磁扰与磁暴的时间分布特征, 二者时间分布差异显著. 2 级及以上中国区域磁扰集中于 04:00－15:00 UT(中国处于昏侧), 并在 11:00 UT 达发生频次峰值; 2 级及以上磁暴的发生数量随 UT 分布均匀, 无明显时段聚集特征.

中国处于昏侧时, 中国区域磁扰数量显著多于同期全球磁暴; 处于晨侧时, 中国区域磁扰数量则明显

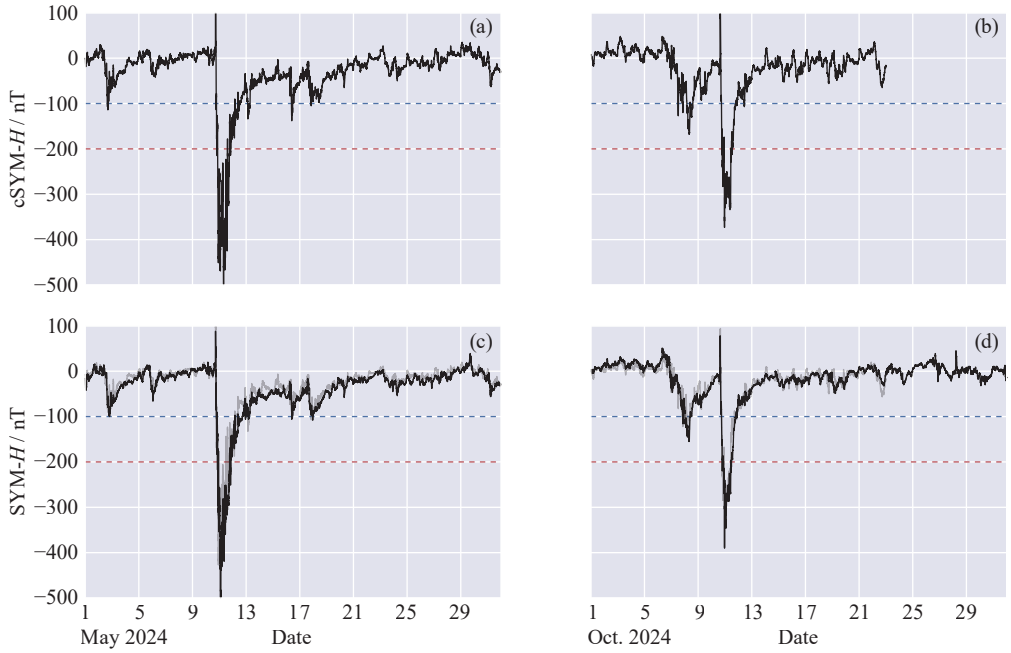



图 12 2024 年 5 月和 10 月磁暴期间 cSYM-*H* 指数和 SYM-*H* 指数与 fSYM-*H* 值的对比

Fig. 12 Comparison of cSYM-*H* index, SYM-*H* index, and fSYM-*H* values during storms in May and October of 2024

**表 7 2024 年 5 月和 10 月磁暴的 fSYM-*H* 和 SYM-*H* 极值**

**Table 7 Minimum values of fSYM-*H* and SYM-*H* of storms in May and October of 2024**

| 序号 | 日期 | 时间 | 中国 | fSYM-*H*/nT | SYM-*H*/nT |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2024-05-11 | 01:51 UT | 昏侧 | –485 | –518 |
| 2 | 2024-10-11 | 23:12 UT | 晨侧 | –387 | –390 |

少于同期全球磁暴. 该统计结果与前文指数比值分析结论一致, 从事件频次角度进一步印证核心规律, 中国位于昏侧时区域地磁扰动剧烈程度高于磁暴强度, 位于晨侧时则低于磁暴强度.

图 13(c) 给出了 fSYM-*H* 识别的 2 级及以上磁暴的时间分布. 从形态可见, fSYM-*H* 值判定的磁暴数量随 UT 变化趋势, 与实测 SYM-*H* 指数判定结果高度相近, 二者均无明显时段聚集性, 整体分布较为均匀.

图 14(a)(b) 给出了 2 级及以上中国区域磁扰与 2 级及以上磁暴的等级分布对比. 数据显示, 各强度等级下中国区域磁扰发生数量均多于磁暴, 说明尽管中国处于晨侧时中国区域磁扰数量少于磁暴, 但由于昏侧时中国区域磁扰的高发性, 最终使中国区域磁扰总数量多于磁暴总量.

由此可推断, SYM-*H* 指数作为全球地磁活动平均水平的表征指标, 其判定的磁暴无法完整覆盖中国区域地磁扰动. 若仅以 SYM-*H* 指数及对应磁暴标准作为中国区域地磁扰动的判定依据, 将因未能充分捕捉区域特有扰动特征 (尤其昏侧时段扰动) 而出现漏报, 这再次凸显了 cSYM-*H* 指数在中国区域地磁活动监测中的必要性与重要性.

图 14(c) 给出了 fSYM-*H* 识别的 2 级及以上磁暴等级分布. 从各强度等级数量分布可见, fSYM-*H* 判定的磁暴数量与实测 SYM-*H* 指数判定结果分布规律比较接近, 不同等级下数量差异较小、趋势基本一致, 进一步印证了反演结果与实测数据的高契合度.

结合图 13(时间分布) 与图 14(等级分布) 的双重验证结果, 可进一步证实 fSYM-H 的可靠性与准确性. 反演得到的 fSYM-*H* 值不仅在数值层面与实测 SYM-*H* 保持高度一致性, 还能精准复现全球磁暴时间分布均匀的核心特征, 同时准确匹配不同强度等级磁暴的数量分布规律. 这一结果明确表明, 当实测

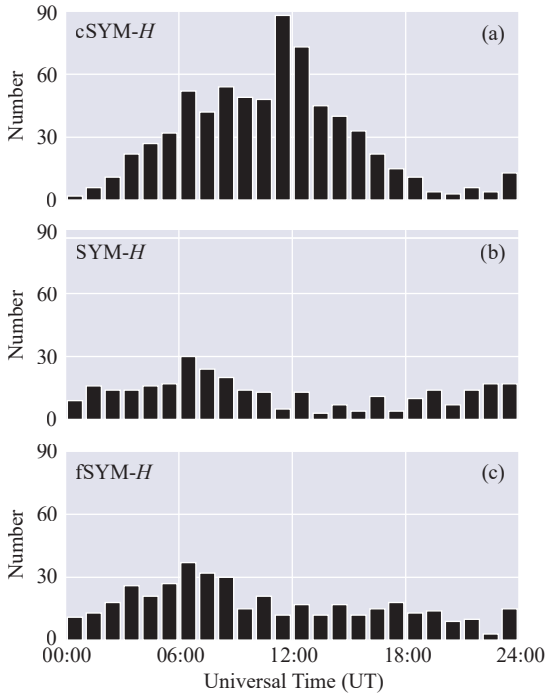



图 13 中国区域磁扰数量 (a)、磁暴数量 (b) 和 fSYM-*H* 值判断得到的磁暴数量 (c) 随 UT 的分布

Fig. 13 Distribution of the number of Chinese geomagnetic disturbances (a), storms (b), and storms determined by fSYM-*H* values (c) with UT

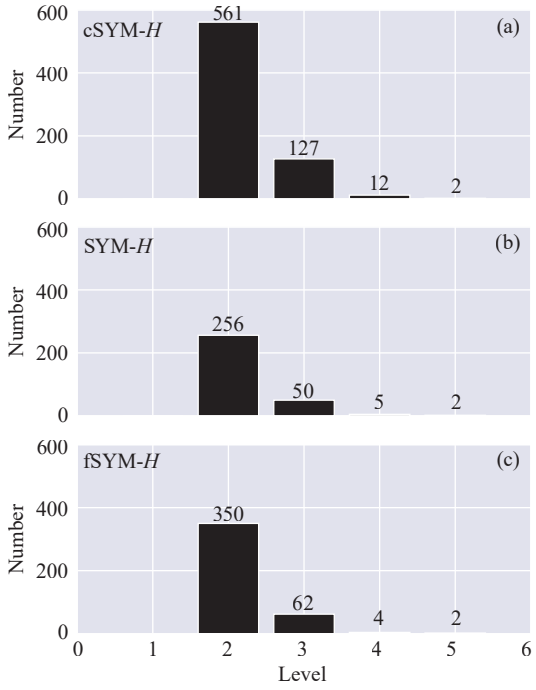



图 14 中国区域磁扰数量 (a)、磁暴数量 (b) 和 fSYM-*H* 值判断得到的磁暴数量 (c) 随等级的分布

Fig. 14 Distribution of the number of Chinese geomagnetic disturbances (a), storms (b), and storms determined by fSYM-*H* values (c) with level

SYM-*H* 指数因观测故障、传输中断等无法获取时, 通过该方法反演的 fSYM-*H* 值可作为高质量补充数据, 有效支撑地磁、磁暴等相关研究工作.

## 4 结论

基于子午工程拉萨、成都、武汉、杭州 4 个站点的地磁观测数据, 构建 c*Dst* 指数与 cSYM-*H* 指数, 通过与 *Dst* 及 SYM-*H* 指数的对比分析, 明确了中国区域地磁指数的核心特征及应用价值, 主要结论如下.

(1) 中国处于昏侧时, c*Dst* 指数和 cSYM-*H* 指数分别小于 *Dst* 指数和 SYM-*H* 指数; 处于晨侧时, c*Dst* 指数和 cSYM-*H* 指数则分别大于对应指数.

(2) 基于 c*Dst* 和 cSYM-*H* 指数判定的中国区域磁扰, 主要集中于中国处于昏侧时; 基于 *Dst* 和 SYM-*H* 指数判定的磁暴, 其小时分布相对均匀.

(3) 中国处于昏侧时, 中国区域磁扰数量显著多于磁暴, 中国区域磁扰剧烈程度高于全球平均水平; 处于晨侧时, 中国区域磁扰数量则少于磁暴, 中国区域磁扰剧烈程度低于全球平均水平.

(4) 地磁活动的晨昏不对称性与环电流的晨昏不对称性密切相关. 环电流在昏侧较强, 所以中国在昏侧时地磁扰动强度大于全球平均水平; 在晨侧较弱, 所以中国位于晨侧时的地磁扰动程度小于全球平均水平.

(5) 总体来说, 中国区域磁扰数量多于磁暴数量, 全球范围地磁指数 (*Dst*/SYM-*H*) 无法完整反映中国区域地磁扰动特征, 而中国区域地磁指数 (c*Dst*/cSYM-*H*) 能更具针对性地反映中国区域地磁扰动情况.

(6) 利用中国区域地磁指数可以很好地反演全球范围地磁指数, 当 *Dst* 和 SYM-*H* 指数因为某些原因无法获取时, 反演得到的 *Dst* 和 SYM-*H* 值可以作为关键补充数据支撑相关研究.

综上所述, 本研究构建的 c*Dst* 与 cSYM-*H* 指数, 分别实现了中国区域地磁扰动小时级与分钟级的精准监测, 揭示了中国区域地磁扰动与全球范围地磁扰动的晨昏差异规律, 且具备全球范围地磁指数反演能

力, 为中国区域地磁扰动相关研究提供了重要的指数产品.

**致谢** 本文使用了国家重大科技基础设施子午工程科学数据 (https://data.meridianproject.ac.cn/). 标准 *Dst* 和 SYM-*H* 指数来自世界地磁数据中心 (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/).

**医学伦理** 研究不涉及人体或动物实验.

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突.

## 参考文献

[1] DONNER R V, BALASIS G, STOLBOVA V, *et al*. Recurrence-based quantification of dynamical complexity in the earth's magnetosphere at geospace storm timescales[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(1): 90-108

[2] CHANG T. Low-dimensional behavior and symmetry breaking of stochastic systems near criticality—can these effects be observed in space and in the laboratory?[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1992, **20**(6): 691-694

[3] CONSOLINI G, ALBERTI T, DE MICHELIS P. On the forecast horizon of magnetospheric dynamics: a scale-to-scale approach[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(11): 9065-9077

[4] KLIMAS A J, VASSILIADIS D, BAKER D N, *et al*. The organized nonlinear dynamics of the magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, **101**(A6): 13089-13113

[5] VALDIVIA J A, ROGAN J, MUÑOZ V, *et al*. The magnetosphere as a complex system[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **35**(5): 961-971

[6] WATKINS N W, FREEMAN M P, CHAPMAN S C, *et al*. Testing the SOC hypothesis for the magnetosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**(13): 1435-1445

[7] DAGLIS I A, THORNE R M, BAUMJOHANN W, *et al*. The terrestrial ring current: origin, formation, and decay[J]. *Reviews of Geophysics*, 1999, **37**(4): 407-438

[8] BOTHMER V, DAGLIS I A. Space Weather: Physics and Effects[M]. Berlin: Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-34578-7

[9] SUGIURA M. Hourly values of equatorial *DstDst* for the IGY[J]. *Annals of the International Geophysical Year*, 1964, **35**: 49

[10] KOTZÉ P B. Hermanus magnetic observatory: a historical perspective of geomagnetism in southern Africa[J]. *History of Geo- and Space Sciences*, 2018, **9**(2): 125-131

[11] MINAMOTO Y. Availability and access to data from Kakioka magnetic observatory, Japan[J]. *Data Science Journal*, 2013, **12**: G30-G35

[12] LOVE J J, FINN C A. The USGS geomagnetism program and its role in space weather monitoring[J]. *Space Weather*, 2011, **9**(7): S07001

[13] LOEWE C A, PRÖLSS G W. Classification and mean behavior of magnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A7): 14209-14213

[14] 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

[15] DAGLIS I A. Ring current dynamics[J]. *Space Science Reviews*, 2006, **124**(1/2/3/4): 183-202

[16] BOROVSKY J E, SHPRITS Y Y. Is the *DstDst* index sufficient to define all geospace storms?[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(11): 11543-11547

[17] KAMIDE Y, BAUMJOHANN W, DAGLIS I A, *et al*. Current understanding of magnetic storms: storm-substorm relationships[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A8): 17705-17728

[18] LANZEROTTI L J. Comment on "Great magnetic storms" by Tsurutani *et al*.[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(19): 1991-1992

[19] GANUSHKINA N, JAYNES A, LIEMOHN M. Space weather effects produced by the ring current particles[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(3): 1315-1344

[20] WELLING D. Magnetohydrodynamic models of B and their use in GIC estimates[M]//GANNON J L, SWIDINSKY A, XU Z H. Geomagnetically Induced Currents from the Sun to the Power Grid. Washington: American Geophysical Union, 2019: 43-65. DOI: 10.1002/9781119434412.ch3

[21] LUCAS G M, LOVE J J, KELBERT A, *et al*. A 100-year geoelectric hazard analysis for the U. S. high-voltage power grid[J]. *Space Weather*, 2020, **18**(2): e2019SW002329

[22] NGWIRA C M, PULKKINEN A, WILDER V, *et al*. Extended study of extreme geoelectric field event scenarios for geomagnetically induced current applications[J]. *Space Weather*, 2013, **11**(3): 121-131

[23] OUGHTON E J, SKELTON A, HORNE R B, *et al*. Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure[J]. *Space Weather*, 2017, **15**(1): 65-83

[24] PULKKINEN A, BERNABEU E, EICHNER J, *et al*. Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios[J]. *Space Weather*, 2012, **10**(4): S04003

[25] WOODROFFE J R, MORLEY S K, JORDANOVA V K,

*et al*. The latitudinal variation of geoelectromagnetic disturbances during large ($DstDst \leqslant -100$ nT) geomagnetic storms[J]. *Space Weather*, 2016, **14**(9): 668-681

[26] ASTAFYEVA E, YASYUKEVICH Y, MAKSIKOV A, *et al*. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems[J]. *Space Weather*, 2014, **12**(7): 508-525

[27] BASU S, BASU S, MACKENZIE E, *et al*. Specification of the occurrence of equatorial ionospheric scintillations during the main phase of large magnetic storms within solar cycle 23[J]. *Radio Science*, 2010, **45**(5): RS5009

[28] BOWMAN B R, TOBISKA W K, MARCOS F A, *et al*. A new empirical thermospheric density model JB2008 using new solar and geomagnetic indices[C]//Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. Honolulu: AIAA, 2008: AIAA 2008-6438. DOI: 10.2514/6.2008-6438

[29] GUO J P, FENG X S, FORBES J M, *et al*. On the relationship between thermosphere density and solar wind parameters during intense geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A12): A12335

[30] OLIVEIRA D M, ZESTA E. Satellite orbital drag during magnetic storms[J]. *Space Weather*, 2019, **17**(11): 1510-1533

[31] RANGARAJAN G. Indices of geomagnetic activity[M]// JACOBS J A. Geomagnetism. London: Academic Press, 1989: 323-384

[32] SICILIANO F, CONSOLINI G, TOZZI R, *et al*. Forecasting SYM-H index: a comparison between long short-term memory and convolutional neural networks[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(2): e2020SW002589

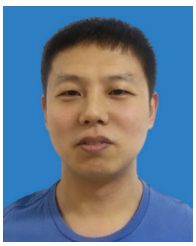
[33] VICHARE G, THOMAS N, SHIOKAWA K, *et al*. Spatial gradients in geomagnetic storm time currents observed by Swarm multispacecraft mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(2): 982-995

[34] WANLISS J A, SHOWALTER K M. High-resolution global storm index: *DstDst* versus SYM-H[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A2): A02202

[35] KOZYRA J U, LIEMOHN M W. Ring current energy input and decay[J]. *Space Science Reviews*, 2003, **109**(1/2/3/4): 105-131

[36] YU Y Q, RIDLEY A J, WELLING D T, *et al*. Including gap region field-aligned currents and magnetospheric currents in the MHD calculation of ground-based magnetic field perturbations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A8): A08207

## 作者简介



**刘子谦** 男, 1984 年 8 月出生于河南省安阳市, 现为中国科学院国家空间科学中心项目高级工程师, 主要研究方向为太阳/行星际扰动和地磁扰动研究、中高层大气特征研究等.
E-mail: zqliu@spaceweather.ac.cn



**李 晖（通信作者）** 男, 1985 年 2 月出生于安徽省铜陵市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为行星际扰动传播及演化、地球空间暴动力学、空间天气影响全球变化等.
E-mail: hli@spaceweather.ac.cn