

FENG Jingyi, ZHOU Yue, LÜ Jianyong, WANG Ming, ZHANG He. Dawn-dusk Asymmetry Distribution of Kelvin-Helmholtz Instability at the Magnetopause of the Mid-magnetotail (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(3): 653–661. CSTR:32142.14.cjss.2024-0038. DOI:10.11728/cjss.2025.03.2024-0038

Kelvin-Helmholtz 不稳定性在中磁尾磁层顶的晨昏不对称性分布*

冯静伊¹ 周悦² 吕建永¹
王明¹ 张赫¹

1(南京信息工程大学大气科学学院 南京 210044)

2(浙江省气象服务中心 杭州 310000)

摘要 地球磁层顶频发的开尔文-赫姆霍兹 (Kelvin-Helmholtz, K-H) 不稳定性在太阳风的物质和能量向地球磁层的输运过程中发挥着重要的作用. 研究筛选出 2015–2020 年中磁尾区域 ($X \approx -60 R_e$) 的磁层顶穿越事件, 结合 51 个中磁尾处的 K-H 不稳定性事件, 统计研究了 K-H 不稳定性在中磁尾磁层顶的晨昏不对称性分布. 结果表明, 在中磁尾区域, 磁层顶晨侧的 K-H 不稳定性发生率较高. 在行星际磁场 (Interplanetary Magnetic Field, IMF) 北向条件下, 发生在磁层顶晨侧的 K-H 不稳定性事件数量明显超越昏侧; 当帕克-螺旋 (Parker-Spiral, PS) IMF 主导时, 昏侧 K-H 不稳定性事件更多. 太阳风的不同参数也会显著影响中磁尾区域磁层顶晨昏两侧的 K-H 涡旋分布. 磁尾区域的 K-H 波动也是导致磁尾等离子体片中不同温度的等离子体分布不对称的原因之一.

关键词 Kelvin-Helmholtz 不稳定性, 晨昏不对称性, 发生率, 磁尾, ARTEMIS 卫星观测

中图分类号 P354

Dawn-dusk Asymmetry Distribution of Kelvin-Helmholtz Instability at the Magnetopause of the Mid-magnetotail

FENG Jingyi¹ ZHOU Yue² LÜ Jianyong¹
WANG Ming¹ ZHANG He¹

1(School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

2(Zhejiang Meteorological Service Center, Hangzhou 310000)

Abstract The Kelvin-Helmholtz (K-H) instability is an unstable phenomenon that occurs in the

* 国家自然科学基金重点项目 (42030203) 和江苏省卓越博士后计划项目 (2023 ZB459) 共同资助

2024-03-12 收到原稿, 2024-04-03 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

boundary layer between two different fluids with velocity shear, and plays an important role in particle, momentum, and energy transport from the solar wind to the magnetosphere. At the Earth's magnetopause, the magnetosheath plasma flows rapidly along the magnetopause and creates a velocity shear with the stationary magnetospheric plasma, providing favorable conditions for the occurrence of the K-H instability. Our investigation selects the magnetopause crossings at the mid-magnetotail region ($X \approx -60 R_e$) from 2015 to 2020 using the observation data from the Acceleration, Reconnection, Turbulence, and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun (ARTEMIS) satellite and, in conjunction with the 51 K-H instability events that also take place in the mid-magnetotail, conducts a statistical analysis of the dawn-dusk asymmetric distribution of K-H instability at the mid-magnetotail magnetopause. The findings suggest that the occurrence rate of K-H instability is relatively high on the dawn side of the magnetopause in the mid-magnetotail region. Under northward Interplanetary Magnetic Field (IMF) condition, the occurrence rate of the K-H instability events on the dawn side significantly surpasses that on the evening side; when the Parker-spiral IMF dominates, there are more K-H instability events on the duskside. The varying parameters of the solar wind also significantly influence the distribution of K-H vortices at dawnside and duskside of the mid-magnetotail magnetopause. Under conditions of low magnetosheath Mach number, the occurrence rate is higher on the dawnside. For slow solar winds, K-H vortices are significantly more frequent on the dawnside compared to the duskside. And the occurrence rate peak on the dawnside is pronounced under low dynamic pressure, while the occurrence rate at duskside is slightly higher than at dawnside for increased dynamic pressure. The K-H waves in the magnetotail region may contribute to the asymmetrical distribution of plasma in the magnetotail plasma sheet.

Key words Kelvin-Helmholtz instability, Dawn-dusk asymmetry, Occurrence rate, Magnetotail, ARTEMIS satellite observation

0 引言

作为地球磁层的外边界,磁层顶不断运动并处于不稳定状态.发生在磁层顶的一系列物理机制控制着太阳风与磁层的质量、动量和能量交换.磁重联是太阳风粒子进入磁层的主要途径,这一等离子体输运过程往往伴随着很强的非绝热加热. Ma 和 Otto^[1]证实只有在磁鞘等离子体的 β 值非常低 ($\beta \ll 1$) 时比熵才有可能在磁重联过程中增加.因此,磁重联并不是完成输运过程的唯一途径.开尔文-赫姆霍兹 (Kelvin-Helmholtz, K-H) 不稳定性被认为是在行星际磁场 (Interplanetary Magnetic Field, IMF) 北向期间的主要可行机制,因而备受关注^[2-6]. K-H 不稳定性是一种流体不稳定性,适用于由速度剪切激发的等离子体动力学.当磁化等离子体的磁场矢量与流动方向垂直,且在边界层两侧存在显著的速度剪切时,很容易激发 K-H 波.在理想的不可压缩等离子体中,当存在不连续的速度剪切层时, K-H 不稳定性的激发条件^[7]为

$$(\mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{v})^2 > \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) [(\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_1)^2 + (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_2)^2]. \quad (1)$$

其中, $\Delta \mathbf{v} = (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)$ 为速度剪切, $\mathbf{B}$ 和 ρ 分别为磁场强度和密度, $\mathbf{k}$ 为 K-H 波的波矢,下标 1 和 2 分别为磁层侧和磁鞘侧.

Dungey^[8]首次提出 K-H 不稳定性在地球磁层顶可能存在.随后,大量的观测结果证实 K-H 涡旋结构在侧翼磁层顶广泛存在^[9-17]. Hasegawa 等^[18]观测到北向 IMF 期间的 18 个符合 K-H 卷积涡旋结构特征的事件,指出 K-H 不稳定性是一种磁层顶中常见的现象,并且其分布具有比较明显的晨昏不对称性. Kavosi 和 Raeder^[19]利用 THEMIS 卫星统计出 K-H 波在近地侧磁层顶的发生率为 19% 左右,并且会受到上游太阳风和行星际磁场条件的影响.

帕克-螺旋 (Parker-Spiral, PS) IMF 在赤道平面上起主导作用,促使磁层顶晨侧产生了准平行激波,而在昏侧形成了准垂直激波^[20].来自准平行激波的增强波动使晨侧磁层顶更具震荡性^[21],导致磁鞘磁场与磁层磁场反平行进而产生磁重联,或者驱动 K-H 涡旋结构的激发^[22]. Cluster 卫星观测到 5 个发生在磁

层顶晨侧的 K-H 涡旋结构, 其上游 IMF 均为 PS 向^[23]. Taylor 等^[12]通过 TC-1 的观测结果挑选出 17 个 K-H 不稳定性事件, 其位置分布具有明显的晨昏不对称性, 有 12 个 (71%) 事件位于昏侧, 表明该区域更有利于 K-H 波的增长. 进一步的分析发现, 正交帕克-螺旋 (Ortho-Parker-Spiral, OPS) IMF 使磁层顶昏侧的切向磁场减弱从而促使这些事件发生. Dimmock 和 Nykyri^[24]通过 THEMIS 卫星的观测数据得出了 PS IMF 对磁层顶的压缩和拖曳作用使得昏侧的磁鞘中产生了更强的切向磁场的结论. 沿尾翼区域存在的强切向磁场能够有效稳定 $\mathbf{k}$ 矢量与该磁场方向一致的 K-H 波模^[25]. 另外, Nykyri^[26]通过磁流体力学 (Magnetohydrodynamics, MHD) 模拟证实了在 PS (OPS) IMF 条件下, MHD 激波会使得晨 (昏) 侧磁鞘的切向磁场更小, 从而导致 K-H 不稳定性的不对称增长. Henry 等^[27]利用近地侧磁层顶 2007—2013 年的观测事件^[19]统计研究了不同的上游太阳风条件和行星际磁场对 K-H 不稳定性晨昏侧的发生率的影响. 结果表明, 在 PS IMF 期间, 磁层顶晨侧的发生率更高; 当 IMF 北向时或是在高速太阳风条件下, 磁层顶昏侧的发生率更高.

Dimmock 等^[28]发现准平行激波下游的离子温度比准垂直激波下游的温度高 15%, 这与磁层顶 K-H 不稳定性发生率的晨昏不对称性结果一致, 说明 K-H 不稳定性可能是引起离子不对称性加热的原因之一^[29-31]. 对磁层顶 K-H 波的晨昏不对称性研究有助于解释地球磁层等离子体片中冷等离子体的温度和密度的不对称性.

目前, 对磁层顶 K-H 不稳定性的研究主要集中在近地侧, 其在磁尾处的发生机制和发生率尚不清楚. 卫星在中磁尾处的观测结果揭示磁尾也是 K-H 不稳定性产生和发展的主要场所^[15,32,33]. Zhou 等^[33]报道了 48 个发生在月球轨道附近磁层顶的 K-H 波, 给出在不同的磁层顶位置 K-H 波的不同特征参数, 但并没有对其分布的晨昏不对称性进行研究. 本文使用 ARTEMIS 卫星筛选出 2015—2020 年中磁尾处的磁层顶穿越事件, 结合 Zhou 等^[33]列举出的 K-H 不稳定性事件, 对中磁尾处 K-H 不稳定性发生率的晨昏不对称分布进行了统计研究.

1 数据与分类标准

1.1 数据

ARTEMIS (Acceleration, Reconnection, Turbulence, and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun) 计划是一个双卫星系统, 围绕月球轨道运行. 两颗卫星 ARTEMIS P1 和 P2 能够同时观测, 使空间分辨率最大化, 既保证了测量精度, 同时增加了观测数据量. 通过卫星上搭载的磁通门磁强计 (Fluxgate Magnetometers, FGM)、静电分析仪 (Electrostatic Analyzers, ESA) 和电场测量仪 (Electric Field Instruments, EFI) 等探测器, 能够获得中磁尾处的等离子体数据. 分析 ARTEMIS P1 卫星 2015—2020 年的观测数据并从中获得了中磁尾即月球轨道距离处 ($X \approx -60 R_e$) 的磁层顶穿越事件, 建立数据库. 其中包含 1863 个磁层顶穿越事件, 这些事件中卫星在磁层顶停留的总时长约为 20000 min. Zhou 等^[33]同样利用 ARTEMIS P1 卫星筛选出了 2015—2020 年中磁尾处的 K-H 不稳定性事件, 结合在筛选磁层顶穿越事件中发现的三个新的 K-H 不稳定性事件, 使用这些事件来研究中磁尾处 K-H 不稳定性的晨昏不对称分布以及上游太阳风和行星际条件对其的影响.

ACE, WIND 和 Geotail 等卫星的观测数据组成了 OMNI 数据库^[34-37], 其包含行星际空间的太阳风等离子体和磁场数据经过时移处理后, 获得了地球弓激波鼻端太阳风参数. 从 NASA CDA Web 网站^{*}获取的分辨率为 1 min 的上游太阳风条件为本研究提供了支持. 以 K-H 不稳定性事件和磁层顶穿越事件的起止时间为基础, 计算出两类事件的总时长, 二者相除得到 K-H 不稳定性事件在磁层顶和不同太阳风条件下的发生率.

1.2 分类标准

行星际磁场的方向多变, 为了系统地分析其对中磁尾处 K-H 涡旋结构的晨昏不对称性的影响以及在近地侧磁层顶和中磁尾处的差异, 参照 Henry 等^[27]的分类标准, 将行星际磁场方向分为 4 种: PS (Parker-Spiral IMF), OPS (Ortho-Parker-Spiral IMF), 北向 (Northward IMF, NIMF) 和南向 (Southward

* <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval1.cgi>

表 1 行星际磁场方向分类标准
Table 1 Classification criteria for the IMF orientations

IMF类型	PS	OPS	NIMF	SIMF
判定标准	$B_x > 0.4B_t$ 且 $B_y < -0.4B_t$ 或 $B_x < -0.4B_t$ 且 $B_y > 0.4B_t$	$B_x > 0.4B_t$ 且 $B_y > 0.4B_t$ 或 $B_x < -0.4B_t$ 且 $B_y < -0.4B_t$	$B_z > 0.5B_t$	$B_z < -0.5B_t$

IMF, SIMF). 具体的判定标准如表 1 所示. 其中总磁场强度用 B_t 表示, 而 B_x , B_y , B_z 分别表示磁场在 x , y , z 方向 (GSM 坐标系, 全称为 Geocentric Solar Magnetospheric, 其原点在地球中心, x 轴由地球中心指向太阳, z 轴指向地球北磁极) 上的大小.

根据上游太阳风参数的分布, 将上游太阳风磁声波马赫数分为低磁声波马赫数 ($4 < M_{ms} \leq 6$) 和高磁声波马赫数 ($6 < M_{ms} \leq 8$) 两种情形; 将上游太阳风速度分为低速太阳风 ($200 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} < |v_{sw}| \leq 400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 和高速太阳风 ($400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} < |v_{sw}| \leq 800 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) 两种情形; 同样, 动压也被划分为高动压和低动压两种. 而总磁场强度则在 $2 \text{ nT} < |B| \leq 4 \text{ nT}$, $4 \text{ nT} < |B| \leq 6 \text{ nT}$, $6 \text{ nT} < |B| \leq 10 \text{ nT}$ 这三个区间内进行讨论. 这种分类方式保证了各个参数区间内样本点是充足的.

2 统计结果分析

研究 K-H 不稳定性发生率晨昏不对称性是为了重点分析 K-H 不稳定性事件的空间分布特征. 对所有磁层顶穿越事件以及 K-H 不稳定性事件发生位置进行详尽统计, 并利用 Shue 等^[38] 提出的磁层顶模型, 结合上游太阳风的动压和磁场数据, 模拟磁层顶的位置, 据此给出所有事件的分布情况 (见图 1). 图 1 分别给出了代表模拟磁层顶和事件发生位置在 xy , xz , yz 平面上的投影.

从图 1 可以看出, 在晨昏两侧, 磁层顶穿越事件的分布大致相同. 而这 51 个 K-H 不稳定性事件中, 有 34 个集中在晨侧 (累计时长为 1972 min), 而昏侧有 17 个 (累计时长为 900 min). 这表明, K-H 不稳定性事件在晨侧的发生频率高于昏侧. 具体来看, 在晨侧的 K-H 不稳定性事件发生率为 20.99%, 而在昏侧则为 13.30%, 整体上显现出一种倾向于晨侧的偏好.

2.1 不同 IMF 方向下发生率晨昏不对称性

上游太阳风和行星际磁场条件的变化会显著地影响发生率的晨昏不对称性. 图 2 给出了不同

IMF 方向下 K-H 不稳定性发生率在晨昏侧的统计结果. 图 2(a) 给出了不同 IMF 方向下晨昏两侧 K-H 不稳定性事件发生率的差异. 在北向 IMF 条件下, 磁层顶晨侧的发生率达到了 46.12%, 远超昏侧的 15.64%, 晨侧明显高于昏侧; 而在南向 IMF 条件下, 磁层顶晨侧和昏侧的发生率分别为 7.67% 和 6.50%, 两者相近并且都明显低于北向 IMF 条件下的发生率. 这说明, K-H 不稳定性事件在北向 IMF 期间更容易发生^[19], 且磁层顶晨侧更有利于 K-H 波的激发.

如图 2(b) 所示, 在 PS IMF 期间, K-H 不稳定性在中磁尾磁层顶昏侧的活跃度显著增加. 具体而言, 在磁层顶的晨侧, K-H 不稳定性发生率为 12.60%, 而其在昏侧的发生率则上升至 21.47%. 然而, 当 OPS IMF 成为主导时, 中磁尾区域的 K-H 不稳定性倾向于在磁层顶的晨侧发生. 此时, 晨侧的发生率上升至 18.90%, 而昏侧降至 10.83%. 这一结果表明, K-H 不稳定性在昏侧的偏好性与整体的晨昏不对称性表现呈现出显著差异.

2.2 上游太阳风参数对晨昏不对称性的影响

图 3 给出了在变化的上游太阳风参数条件下, 中磁尾磁层顶的 K-H 不稳定性发生率在晨侧与昏侧的差异. 分析图 3(a) 可以得出, 低磁声波马赫数条件下, 晨侧的 K-H 不稳定性发生率显著高于昏侧. 相比之下, 在高磁声波马赫数的情况下, 两侧的发生率相差不多, 晨侧依然略高于昏侧. 这一结论暗示低磁声波马赫数和晨侧环境是促进 K-H 不稳定性发生的两个关键因素. 这一发现与 Miura 和 Pritchett^[39] 的结论相吻合, 即磁声波马赫数与 K-H 不稳定性发生率呈反相关.

中磁尾磁层顶 K-H 不稳定性发生率的晨昏不对称性也会对太阳风速度的变化做出响应. 如图 3(b) 所示, 在低速太阳风条件下, 晨侧的 K-H 不稳定性发生率明显高于昏侧; 反之, 在高速太阳风环境下, K-H 波在磁层顶昏侧更活跃. 此外, 无论是在晨侧还是昏侧, 低速太阳风条件更有利于 K-H 不稳定性波的激发.

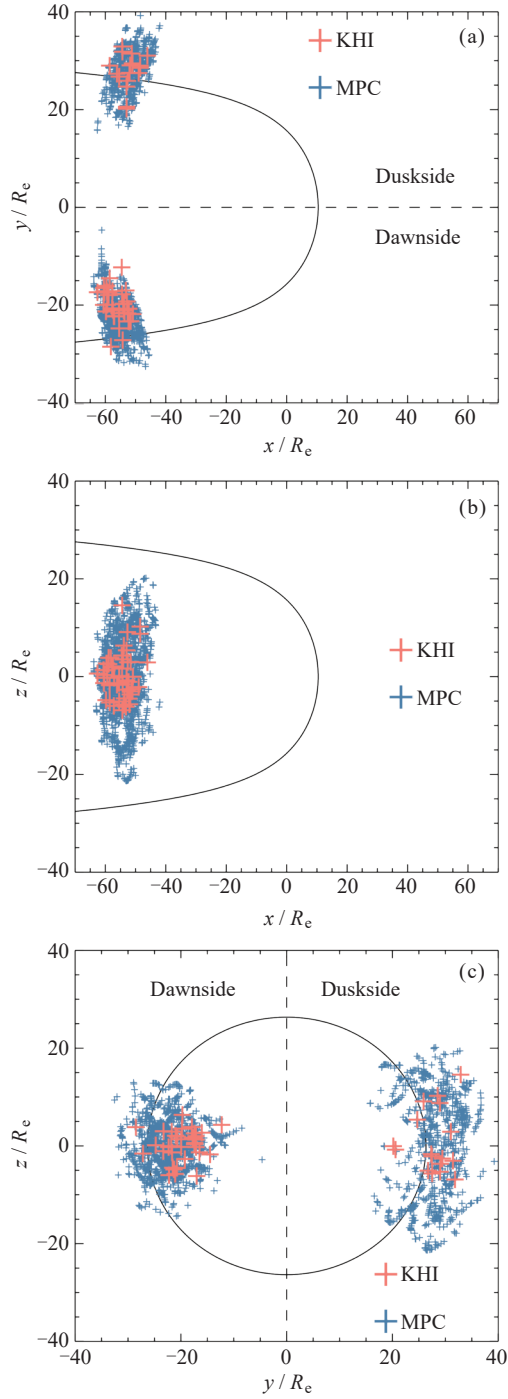


图1 2015–2020年由ATREMIS卫星观测到的中磁尾处所有磁层顶穿越事件和K-H不稳定性事件的分布(磁层顶位形由文献[38]提出的磁层顶模型模拟得出)
Fig. 1 Distribution of all Magnetopause crossing (MPC) events and K-H Instability (KHI) events observed by the ATREMIS satellite at the mid magnetotail from 2015 to 2020 (The shape of the magnetopause is given by the magnetopause model proposed by Ref. [38])

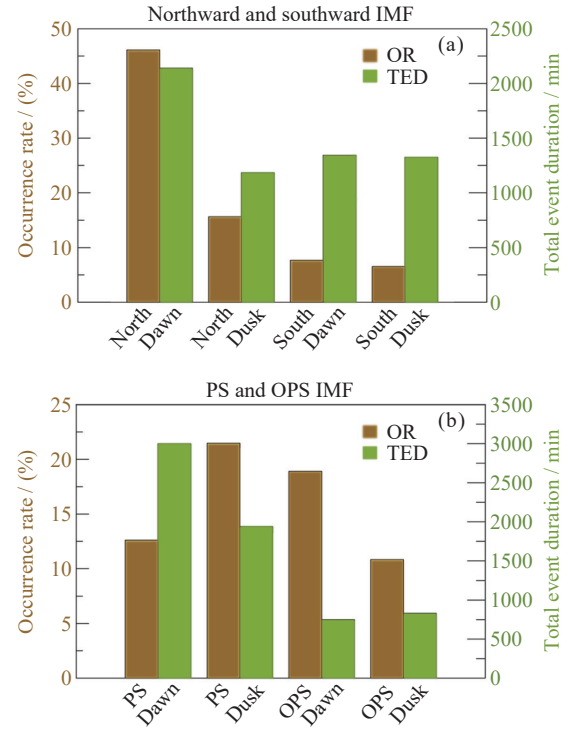


图2 不同IMF方向下K-H不稳定性在中磁尾磁层顶晨昏侧的发生率统计

Fig. 2 Statistics on the incidence of K-H instability in the mid-magnetotail magnetopause on the morning and evening sides under different IMF directions

动压同样对K-H不稳定性发生率晨昏差异产生了影响,并表现出与太阳风速度作用下相似的结果.在低动压条件下,磁层顶晨侧的发生率显著高于其他情况;而在动压增强时,昏侧的发生率则略大于晨侧.

根据1.2节中提出的分类标准,将磁场强度分为三个区间进行探讨.图4给出了磁场强度对晨昏两侧K-H不稳定性发生率的影响.统计结果表明,在低磁场强度($2\text{ nT} < |B| \leq 4\text{ nT}$)和高磁场强度($6\text{ nT} < |B| \leq 10\text{ nT}$)条件下,K-H不稳定性在磁层顶晨侧的发生频率均高于昏侧,且两侧差异显著.然而,在中等磁场强度区间($4\text{ nT} < |B| \leq 6\text{ nT}$),昏侧的发生频率略高于晨侧,这与总体趋势形成对比.

表2给出了在各种参数条件及不同数值区间下,中磁尾磁层顶的晨侧与昏侧K-H不稳定性发生率的具体数据.从中可以看到大多数情况下,在中磁尾区域,磁层顶晨侧的发生率大于昏侧.

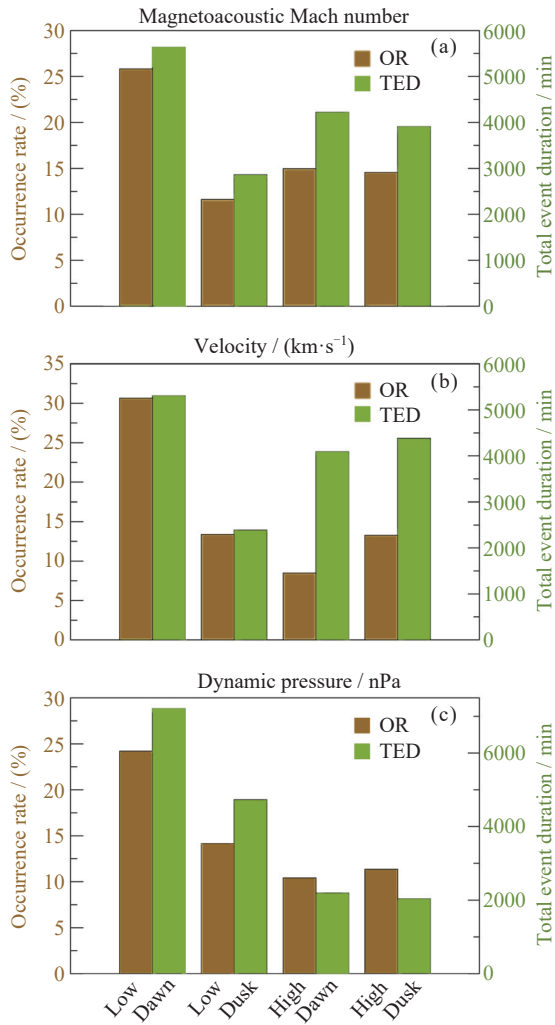


图3 不同的磁声波马赫数、速度和动压条件下 K-H 不稳定性在中磁尾磁层顶晨侧和昏侧的发生率统计结果

Fig. 3 Statistical results of the incidence rate of K-H instability at the mid-magnetotail magnetosphere on the morning and dusk sides under different conditions of magnetoacoustic Mach number, velocity, and dynamic pressure

3 近地侧磁层顶统计结果对比与讨论

Henry 等^[27]利用 THEMIS 卫星和 OMNI 数据库统计研究了近地侧磁层顶 K-H 不稳定性发生率的晨昏不对称性,发现磁层顶晨侧的 K-H 不稳定性事件数量更多.整体而言,近地侧磁层顶晨侧区域的发生率更高,本研究结果与此结论一致.

但是近地磁层顶 PS (OPS) IMF 主导时,昏侧

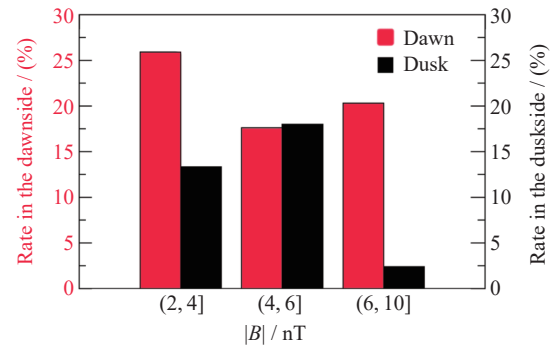


图4 在不同的磁场强度区间内中磁尾磁层顶 K-H 不稳定性发生率在晨侧和昏侧的统计结果

Fig. 4 Statistical results of the occurrence rate of K-H instability at the top of the magnetotail magnetosphere in different magnetic field intensity ranges on the morning and dusk sides. The gray and black bars represent the incidence of K-H instability on the morning and evening sides, respectively

(晨侧)的发生率明显高于晨侧(昏侧).而中磁尾磁层顶晨侧,大多数的 K-H 波发生在北向 IMF 条件下.这一差异是因为引起近地侧和磁尾磁层顶晨侧 K-H 不稳定性发生率更高的原因不同.在近地侧,当 PS IMF 主导时,近地侧磁层顶晨侧的 K-H 不稳定性事件发生率明显高于昏侧;而在 OPS IMF 期间,则反之. IMF 多是 PS 向的,而由 PS (OPS) IMF 引起的准平行激波会使得晨(昏)侧磁层顶更加活跃,为 K-H 涡旋结构的激发提供有利条件.而在中磁尾,结果则完全相反.磁尾独特的结构特点使得不同的 IMF 方向下形成的切向磁场大小与日侧不同,最终导致 K-H 不稳定性发生率的晨昏不对称性在两个区域有不同的表现.

通过统计分析近地侧 K-H 不稳定性事件所对应的磁场三分量、磁场强度、速度三分量和太阳风马赫数的均值发现,在昏侧当上游太阳风速度较大时 K-H 不稳定性事件更容易发生^[27].另外,发生在近地侧磁层顶昏侧的 K-H 不稳定性事件所对应的阿尔芬马赫数均值较小.这是因为昏侧的切向磁场更大,对磁层顶波动的抑制作用更强,需要更大的速度剪切来满足 K-H 不稳定性的激发条件.

在本文的研究中,同样对 K-H 不稳定性事件所对应的上游太阳风参数的均值进行了分析.结果表明,在中磁尾磁层顶昏侧, K-H 不稳定性事件所对应的上游太阳风速度较大.这说明,在中磁尾的磁层顶

表 2 各种参数条件及不同数值区间内 K-H 不稳定性在中磁尾磁层顶晨侧和昏侧的发生率
Table 2 Incidence of K-H instability in the dawn and dusk sides of the mid-magnetotail magnetosphere under various parameter conditions and different numerical ranges

Parameter	Range	Rate on the dawnside/(%)	Rate on the duskside/(%)
IMF orientation	Northward	46.12	15.64
	Southward	7.67	6.50
	PS	12.60	21.47
	OPS	18.90	10.83
Magnetosonic Mach number	$4 < M_{\text{ms}} \leq 6$	25.81	11.61
	$6 < M_{\text{ms}} \leq 8$	14.96	14.54
Magnetic field magnitude/nT	$2 < B \leq 4$	25.91	13.33
	$4 < B \leq 6$	17.62	18
	$6 < B \leq 10$	20.30	2.4
Velocity/(km·s ⁻¹)	$200 < v \leq 400$	30.64	13.37
	$400 < v \leq 800$	8.46	13.26
Dynamic pressure/nPa	$0 < P_d \leq 2$	24.21	14.41
	$2 < P_d \leq 4$	10.41	11.35

注 加黑数据为相同条件下较高的发生率.

昏侧同样存在较强的切向磁场. 但是目前还不清楚这种强切向磁场的形成与 IMF 方向之间有何种联系. 从磁层结构来看, 磁层顶晨昏两侧基本具有相同的特征. 而太阳风在经过磁鞘压缩后沿着磁层向后传播, 磁层顶晨昏两侧的太阳风特征参数并不会存在显著差异. 因此, 还需要更加深入的研究来探寻磁层顶 K-H 不稳定性发生率的晨昏不对称性的物理机制. 同时, K-H 不稳定性发生率的晨昏不对称性在近地侧和中磁尾处的表现相差很大. 除了磁层结构和太阳风参数的影响外, 也可能是 K-H 波在由日侧磁层顶向磁尾传播的过程中涡旋结构发生了改变, 比如合并和破碎. 最终并不是所有在近地侧激发的涡旋结构都能被传播到磁尾.

4 结论

通过分析 2015—2020 年收集的磁层顶穿越事件, 以及包含 51 例 K-H 不稳定性事件的数据集, 本研究对中磁尾区域 K-H 不稳定性事件的晨昏分布差异进行了详细统计分析. 首先, 明确了这些不稳定性事件在中磁尾的具体位置. 随后, 探讨了太阳风的各项参

数, 包括 IMF 的方向、磁场强度、太阳风的速度及动压等, 对中磁尾 K-H 不稳定性事件发生率的晨昏差异所产生的影响. 经过研究, 可以注意到中磁尾区域的 K-H 不稳定性事件表现出明显地向晨侧倾斜的分布趋势, 且会受到不同太阳风参数的影响而有所改变. 进一步将其与近地侧磁层顶的 K-H 不稳定性事件发生率的晨昏不对称性结果进行对比, 结果显示, 在磁层顶的不同区域, 这种晨昏不对称性分布存在显著差异. 得出主要结论如下.

(1) 在中磁尾区域磁层顶, 晨侧的 K-H 不稳定性发生率相对较高.

(2) IMF 的方向显著地影响了中磁尾区域磁层顶的 KH 不稳定性发生率的晨昏不对称性. 北向 IMF 条件下, 在磁层顶的晨侧, K-H 不稳定性发生率明显超越昏侧; 当 PS IMF 主导时, 发生在磁层顶昏侧的 K-H 不稳定性事件数量更多.

(3) 太阳风的不同参数也会对中磁尾区域磁层顶晨昏两侧的 K-H 不稳定性发生率产生影响. 在低磁声波马赫数条件下, 晨侧的发生率比昏侧高; 而在高磁声波马赫数环境中, 虽然两侧的发生率较为接近, 晨侧仍略超过昏侧. 对于低速太阳风的情况, K-H 不

稳定性在晨侧的发生率显著高于昏侧. 在低动压条件下, 晨侧的发生率达到最高, 明显超越其他条件; 而当动压增强时, 昏侧的发生率略超晨侧.

(4) 在中磁尾磁层顶昏侧, K-H 不稳定性事件所对应的平均上游太阳风速度较大, 说明在昏侧区域可能存在较强的切向磁场, 从而抑制了 K-H 波的激发.

研究主要阐述了中磁尾区域磁层顶 K-H 不稳定性发生率的晨昏差异现象, 对于深入理解 K-H 不稳定性在地球磁层中的分布特征及其触发过程具有重要意义. 此外, K-H 不稳定性是能够促进离子加热的动力学尺度波动的驱动力. 在近地侧磁层顶, K-H 不稳定性分布的晨昏差异有助于阐明冷离子组分在等离子体片中不对称性分布的原因. 同时, 磁尾区域的 K-H 波动可能也是导致磁尾等离子体片中不同温度的等离子体分布不对称的原因之一. 未来工作将着重分析在其他太阳风参数影响下, K-H 不稳定性事件在晨昏两侧的分布特征, 并探索中磁尾磁层顶 K-H 不稳定性发生频率晨昏不对称性的成因.

参考文献

- [1] MA X Y, OTTO A. Nonadiabatic heating in magnetic reconnection[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(7): 5575-5588
- [2] COWEE M M, WINSKE D, GARY S P. Hybrid simulations of plasma transport by Kelvin-Helmholtz instability at the magnetopause: density variations and magnetic shear[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A6): A06214
- [3] MA X Y, OTTO A, DELAMERE P A. Interaction of magnetic reconnection and Kelvin-Helmholtz modes for large magnetic shear: 1. Kelvin-Helmholtz trigger[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(2): 781-797
- [4] MATSUMOTO Y, HOSHINO M. Turbulent mixing and transport of collisionless plasmas across a stratified velocity shear layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A5): A05213
- [5] NAKAMURA T K M, HASEGAWA H, SHINOHARA I, et al. Evolution of an MHD-scale Kelvin-Helmholtz vortex accompanied by magnetic reconnection: two-dimensional particle simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A3): A03227
- [6] OTTO A, FAIRFIELD D H. Kelvin-Helmholtz instability at the magnetotail boundary: MHD simulation and comparison with Geotail observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A9): 21175-21190
- [7] CHANDRASEKHAR S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability[M]. Oxford: Clarendon Press, 1961
- [8] DUNGEY J W. Electrodynamics of the Outer Atmosphere [C]//Physics of the Ionosphere. London: The Physical Society, 1955: 229
- [9] FAIRFIELD D H, OTTO A, MUKAI T, et al. Geotail observations of the Kelvin-Helmholtz instability at the equatorial magnetotail boundary for parallel northward fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A9): 21159-21173
- [10] HASEGAWA H, FUJIMOTO M, PHAN T D, et al. Transport of solar wind into Earth's magnetosphere through rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices[J]. *Nature*, 2004, **430**(7001): 755-758
- [11] HWANG K J, KUZNETSOVA M M, SAHRAOUI F, et al. Kelvin-Helmholtz waves under southward interplanetary magnetic field[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A8): A08210
- [12] TAYLOR M G G T, LAVRAUD B, ESCOUBET C P, et al. The plasma sheet and boundary layers under northward IMF: a multi-point and multi-instrument perspective [J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(10): 1619-1629
- [13] LIN D, WANG C, LI W Y, et al. Properties of Kelvin-Helmholtz waves at the magnetopause under northward interplanetary magnetic field: statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(9): 7485-7494
- [14] YAN G Q, MOZER F S, SHEN C, et al. Kelvin-Helmholtz vortices observed by THEMIS at the duskside of the magnetopause under southward interplanetary magnetic field[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(13): 4427-4434
- [15] LING Y M, SHI Q Q, SHEN X C, et al. Observations of Kelvin-Helmholtz waves in the Earth's magnetotail near the lunar orbit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(5): 3836-3847
- [16] NAKAMURA T K M, BLASL K A, HASEGAWA H, et al. Multi-scale evolution of Kelvin-Helmholtz waves at the Earth's magnetopause during southward IMF periods[J]. *Physics of Plasmas*, 2022, **29**(1): 012901
- [17] NAKAMURA T K M, BLASL K A, LIU Y H, et al. Diffusive plasma transport by the magnetopause Kelvin-Helmholtz instability during southward IMF[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2022, **8**: 809045
- [18] HASEGAWA H, FUJIMOTO M, TAKAGI K, et al. Single-spacecraft detection of rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices at the flank magnetopause[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A9): A09203
- [19] KAVOSI S, RAEDER J. Ubiquity of Kelvin-Helmholtz waves at Earth's magnetopause[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**(1): 7019
- [20] EASTWOOD J P, BALOGH A, DUNLOP M W, et al. Cluster observations of fast magnetosonic waves in the terrestrial foreshock[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(22): 20246

- [21] RUSSELL C T, PETRINEC S M, ZHANG T L, *et al.* The effect of foreshock on the motion of the dayside magnetopause[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**(12): 1439-1441
- [22] CHEN Q, OTTO A, LEE L C. Tearing instability, Kelvin-Helmholtz instability, and magnetic reconnection[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A1): 151-161
- [23] NYKYRI K, OTTO A, LAVRAUD B, *et al.* Cluster observations of reconnection due to the Kelvin-Helmholtz instability at the dawn-side magnetospheric flank[J]. *Annales Geophysicae*, 2006, **24**(10): 2619-2643
- [24] DIMMOCK A P, NYKYRI K. The statistical mapping of magnetosheath plasma properties based on THEMIS measurements in the magnetosheath interplanetary medium reference frame[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(8): 4963-4976
- [25] NYKYRI K, OTTO A. Influence of the Hall term on KH instability and reconnection inside KH vortices[J]. *Annales Geophysicae*, 2004, **22**(3): 935-949
- [26] NYKYRI K. Impact of MHD shock physics on magnetosheath asymmetry and Kelvin-Helmholtz instability[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(8): 5068-5081
- [27] HENRY Z W, NYKYRI K, MOORE T W, *et al.* On the dawn-dusk asymmetry of the Kelvin-Helmholtz instability between 2007 and 2013[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(12): 11888-11900
- [28] DIMMOCK A P, NYKYRI K, KARIMABADI H, *et al.* A statistical study into the spatial distribution and dawn-dusk asymmetry of dayside magnetosheath ion temperatures as a function of upstream solar wind conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(4): 2767-2782
- [29] WANG C P, GKIOULIDOU M, LYONS L R, *et al.* Spatial distributions of the ion to electron temperature ratio in the magnetosheath and plasma sheet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A8): A08215
- [30] HASEGAWA H, FUJIMOTO M, MAEZAWA K, *et al.* Geotail observations of the dayside outer boundary region: Interplanetary magnetic field control and dawn-dusk asymmetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A4): 1163
- [31] WING S, JOHNSON J R, NEWELL P T, *et al.* Dawn-dusk asymmetries, ion spectra, and sources in the northward interplanetary magnetic field plasma sheet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A8): A08205
- [32] ZHOU Y, LU J Y, WANG M. Kelvin-Helmholtz waves on the magnetopause at the lunar distances under southward IMF: ARTEMIS observations[J]. *Universe*, 2022, **8**(4): 209
- [33] ZHOU Y, SHUE J H, HASEGAWA H, *et al.* Spatial scales of the velocity shear layer and Kelvin-Helmholtz waves on the magnetopause: first statistical results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(4): e2021GL097271
- [34] FARRELL W M, THOMPSON R F, LEPPING R P, *et al.* A method of calibrating magnetometers on a spinning spacecraft[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, **31**(2): 966-972
- [35] GLOECKLER G, BALSIGER H, BÜRGEL A, *et al.* The solar WIND and suprathermal ion composition investigation on the WIND spacecraft[J]. *Space Science Reviews*, 1995, **71**(1/4): 79-124
- [36] MCCOMAS D J, BAME S J, BARKER P, *et al.* Solar wind electron proton alpha monitor (SWEPAM) for the advanced composition explorer[J]. *Space Science Reviews*, 1998, **86**(1/4): 563-612
- [37] SMITH C W, L'HEUREUX J, NESS N F, *et al.* The ACE magnetic fields experiment[J]. *Space Science Reviews*, 1998, **86**(1/4): 613-632
- [38] SHUE J H, CHAO J K, FU H C, *et al.* A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A5): 9497-9511
- [39] MIURA A, PRITCHETT P L. Nonlocal stability analysis of the MHD Kelvin-Helmholtz instability in a compressible plasma[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1982, **87**(A9): 7431-7444

作者简介



冯静伊 女, 2000年1月出生于河南省洛阳市, 南京信息工程大学大气物理学院空间天气研究所2021级硕士研究生, 主要研究方向为太阳风-磁层耦合。
E-mail: fengjingyi222@163.com



周悦 (通信作者) 女, 1994年2月出生于河南省鹤壁市, 南京信息工程大学数学与统计学院空间天气研究所2019级博士研究生, 现为浙江省气象服务中心工程师, 主要研究方向为太阳风-磁层耦合。
E-mail: zhouyue_muist@163.com, jylu@nuist.edu.cn



吕建永 (通信作者) 男, 1966年8月出生于河北省行唐市, 现为南京信息工程大学大气物理学院教授, 主要研究方向为空间天气预报和灾害评估、多尺度空间天气数值模拟与仿真、太阳风-磁层-电离层耦合等。
E-mail: jylu@nuist.edu.cn