0254-6124/2024/44(6)-0998-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YANG Lixian, LIU Si, GAO Zhonglei, ZHOU Yaxiong, GAO Yang, WANG Bowen, JIN Yuyue. Statistical Study on Propagation Characteristics of Chorus in the Earth's Magnetosphere (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 998–1005. CSTR:32142.14.cjss.2024–yg27. DOI:10.11728/cjss2024.06.2024–yg27

≫空间环境中的等离子体物理过程

地球磁层中合声波的频率与传播角分布特征*

杨立贤　刘　斯　高中磊　周亚雄
高　阳　王博闻　金宇玥

(长沙理工大学物理与电子科学学院　长沙　410004)

摘　要　合声波的频率和传播角是影响其与电子相互作用的关键参数. 2013 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日期间范艾伦卫星数据的统计分析结果表明, 在传播角 $\theta\approx35°$处, 较强的合声波 ($>7\times10^{-4}$ $mV^2\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$) 更倾向于出现在更窄的频率范围 (0.3～0.4 f_{ce}). 随着磁壳数 L 的增大, $\theta\approx35°$处的合声波频谱变窄趋势逐渐明显. 从夜侧到晨侧 (21:00 MLT－09:00 MLT), 较强的合声波能够在 0.1～0.8 f_{ce} 的频率范围内被观测到, 但夜侧 $\theta\approx35°$处的合声波频谱宽度比晨侧更窄. 从上午到昏侧 (09:00 MLT－21:00 MLT), 合声波电场功率谱密度明显降低, 且主要以斜传播 ($\theta>60°$) 的下带合声波为主. 随着磁纬度 λ_{MLAT} 的增大, 上带合声波迅速减弱. 同时, $\theta\approx35°$处的下带合声波电场功率谱密度也逐渐下降. 本文揭示了不同区域内合声波强度的频率和传播角分布特征, 为构建更加精确的合声波–电子相互作用全球模型提供了重要信息.

关键词　辐射带, 范艾伦探测器, 统计分析, 合声波, 传播角

中图分类号　P354

Statistical Study on Propagation Characteristics of Chorus in the Earth's Magnetosphere

YANG Lixian　LIU Si　GAO Zhonglei　ZHOU Yaxiong
GAO Yang　WANG Bowen　JIN Yuyue

(*School of Physics and Electronic Sciences, Changsha University of Science and Technology, Changsha* 410004)

Abstract　The frequency and normal angle of chorus waves are the key parameters affecting its interaction with electrons. Statistical analysis of Van Allen satellite data from 1 January 2013 to 31 December 2015, indicates that the strong chorus waves ($>7\times10^{-4}$ $mV^2\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$) tend to appear in a narrower frequency range (0.3～0.4 f_{ce}) at normal angle θ around 35°. As L increases, the trend of narrowing chorus wave spectrum at $\theta\approx35°$ becomes more pronounced. From the night to the dawn (21:00 MLT－09:00 MLT), chorus waves can be observed within a frequency range of 0.1～0.8 f_{ce}, but the spectral width of

* 国家自然科学基金项目资助 (42374199, 42274212, 42304183)

2024-10-05 收到原稿, 2024-11-07 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

chorus waves at $\theta\approx35°$ on the nightside is narrower than that on the dawn. From the morning to the dusk (09:00 MLT−21:00 MLT), the electric power spectral density of chorus waves decreases significantly, mainly manifesting as lower band chorus waves with oblique propagation ($\theta>60°$). With increasing magnetic latitude ($\lambda_{\rm MLAT}$), the upper band chorus waves diminish rapidly, and the electric power spectral density of the lower band chorus waves at $\theta\approx35°$ also gradually decreases. This study reveals the distribution characteristics of chorus wave intensity in terms of frequency and the normal angle in different regions, providing crucial information for constructing a more accurate global model of chorus wave-electron interactions.

Key words Radiation belts, Van Allen Probes, Statistical analysis, Chorus, Normal angle

0 引言

哨声模合声波 (Chorus) 是磁层中非常重要的等离子体波动, 主要出现在等离子体层顶外的低密度区域[1]. 合声波由等离子体片注入的具有温度各向异性的能量电子 (能量约 10 keV) 所激发[2–5]. 在地磁扰动期间, 磁尾等离子体片中的能量电子从午夜侧注入, 向内运动到磁场更强的区域, 其垂直动能逐渐大于平行动能, 形成温度各向异性, 从而提供了激发合声波的自由能. 前期研究也证实合声波的强度与磁暴或亚暴存在很高的相关性[6,7]. 由于注入的电子自西向东漂移, 合声波主要分布在夜侧和晨侧 (约 21:00 MLT−14:00 MLT)[8], 且晨侧发生率最高[9–11].

合声波通常出现在 0.1～0.8 $f_{\rm ce}$ ($f_{\rm ce}$ 为电子回旋频率) 之间, 并且被 0.5 $f_{\rm ce}$ 处的能量间隙 (Power Gap) 分割为上下两个频带[12–14]. 合声波能够与电子发生回旋共振, 对磁层电子动力学演化起着重要的作用[15–19]. 一方面, 合声波能够将几百 keV 的电子加速至 MeV[20–22], 使得“杀手电子”通量迅速增长[23–26], 可能导致空间天气灾害. 另一方面, 合声波能够散射较低能量 (0.1～30 keV) 的电子进入损失锥, 进而沉降到高层大气, 引起弥散极光[27–29]. 合声波与电子发生回旋共振的条件为 $\omega-k_{||}v_{||}=n\,\Omega_{\rm e}/\gamma$, 其中 n 为共振阶数, ω 为波的角频率, $k_{||}$为平行于背景磁场方向的波数, 由波矢 $\boldsymbol{k}$ 和传播角 θ 确定, $v_{||}$为平行于背景磁场的速度, $\Omega_{\rm e}$ 为电子回旋频率, γ 为洛伦兹因子. 由此可见, 合声波的频率和传播方向是影响其与电子相互作用的关键参数. 以往利用准线性模型研究合声波与电子的相互作用均假设合声波为平行或准平行传播 ($\theta<30°$)[30,31]. 然而一些观测和二维模拟表明, 随着磁纬度的增加, 合声波的传播角逐渐变大[32–34]. 因此, 为了构建合声波–电子相互作用的精细化模型, 需要得到合声波频率和传播角全球分布特征.

1 卫星数据与识别方法

范艾伦探测器 (Van Allen Probes) 由 A 和 B 两颗卫星构成. 这两颗卫星运行在相同的椭圆轨道上, 并搭载了多组测量电磁场和带电粒子的仪器, 主要用于研究地球辐射带中的多种物理过程[35]. 数据来源主要是电磁场综合探测仪 EMFISIS (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science). 其中, 该仪器的波形接收器 (Waveform Receiver) 可以提供 0.01～12 kHz 的电磁场功率谱密度信息, 用于采集合声波的电磁分量信息. 三轴磁通门 (tri-axial Fluxgate Magnetometer) 能够对背景磁场矢量进行测量, 用于计算局地电子回旋频率并估算波的传播角. 高频接收器 (High Frequency Receiver) 能够记录上混杂共振频率, 结合磁场数据可以估算局地电子密度[36].

研究采用的是 EMFISIS Level 4 数据集, 该数据集直接提供了波动的功率谱密度、传播角、平面度、椭圆极化率、卫星所在位置 (L, MLT, $\lambda_{\rm MLAT}$) 及局地电子数密度等信息. 由于合声波是出现在等离子体层外的右旋圆极化波动, 主要采用以下标准对合声波进行识别: (1) 电子数密度 $n_{\rm e}<30$ cm^{-3}, (2) 频率范围为 0.1～0.8 $f_{\rm ce}$, (3) 磁场功率谱密度 $>10^{-9}$ nT^2·Hz^{-1}, (4) 平面度>0.6, (5) 椭圆率>0.7. 鉴于电子数密度数据存在部分缺失, 采用线性插值法填补空缺数据; 如果插值时间点与前一数据点的时间间隔超过 5 min, 则认为该插值无效. 图 1 给出了 2013 年 5 月 7 日由范艾伦卫星 B 所记录的合声波事例. 图 1(a)～(e) 分别给出了 00:00 UT−24:00 UT 期间电子数密度、合

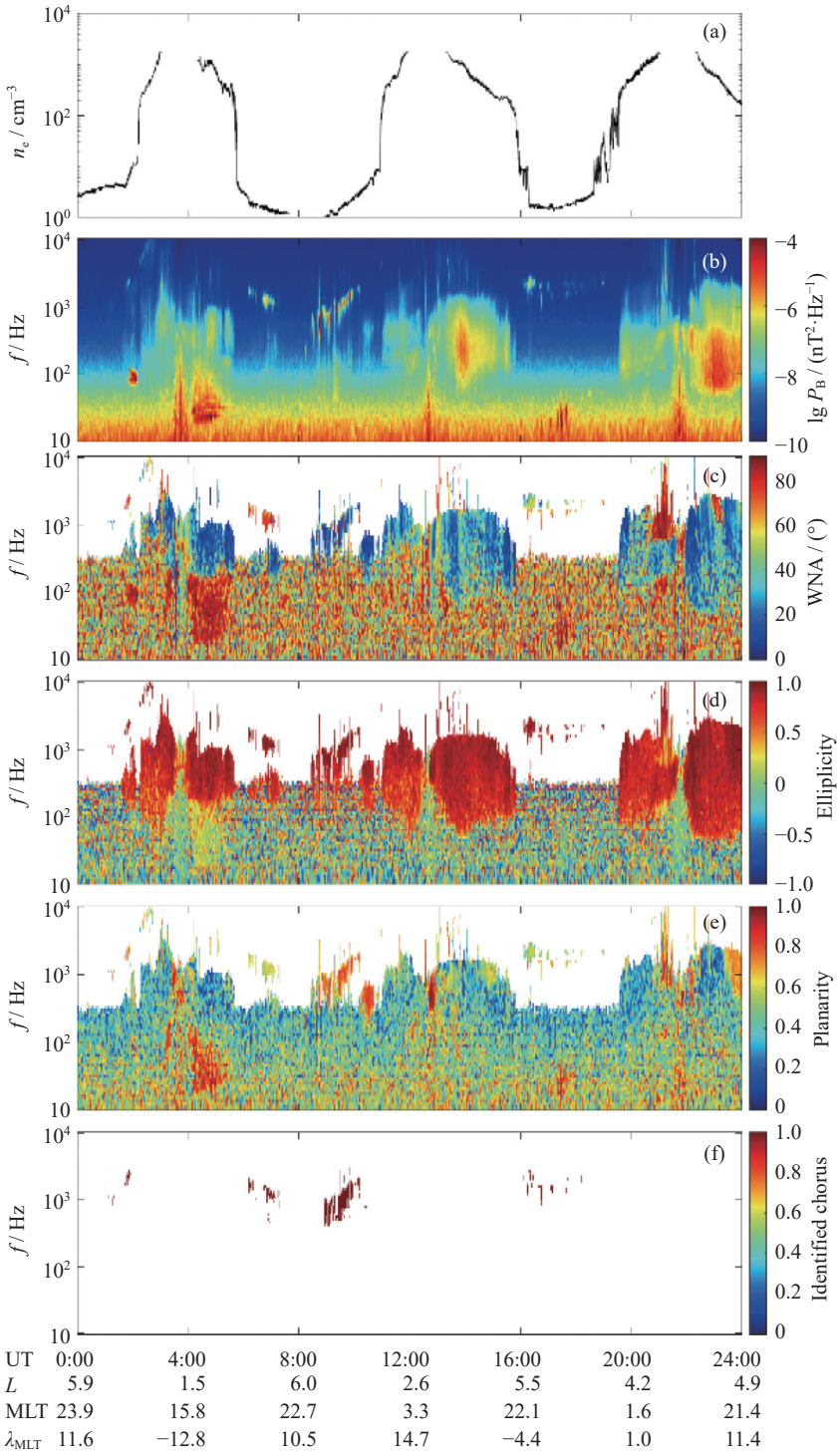


图 1 2013 年 5 月 7 日范艾伦探测器-B 观测到的合声波相关波谱数据

Fig. 1 Van Allen Probe-B observation data on 7 May 2013

声波磁场功率谱密度、传播角、椭圆极化率和平面度的信息. 图 1(f) 中红色标记的波动代表了识别出的合声波, 这些波动表现出右旋椭圆极化特性, 传播角在 20°～40°内. 根据上述标准, 选用范艾伦卫星 A 和 B 两个探测器在 2013 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日期间的数据, 对合声波进行识别. 将 EMFISIS 电磁场功率谱上每一个时间点定义为一个样本, 共获得 18048906 个样本. 同时将这些样本的电场 (磁

场) 功率谱密度进行统计分析, 得到在传播角 θ 和归一化频率 $f_n=f/f_{ce}$ 组成的坐标系中, 合声波平均磁场和电场功率谱密度的分布. 为便于精确分析, 传播角 θ 分辨率设为 2°, 归一化频率 f_n 设为 0.025, 从而在 θ-f_n 坐标系中划分了 45 (θ=0°～90°)×28 (f_n=0.1～0.8) 个网格. 下文中所有 θ-f_n 坐标系均按此划分网格. 对于每一个 2°×0.025 的网格, 排除了样本数量少于 100 的网格, 从而在 θ-f_n 坐标系中, 对不同 L, MLT 和 λ_{MLAT} 范围的合声波电场功率谱密度的变化特征进行讨论.

2 合声波传播特性的统计

图 2 给出了研究识别的合声波磁场和电场功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的分布情况. 从图 2 中可以看出, 合声波被 0.5 f_{ce} 分隔为上下两个频带, 且下带合声波的强度明显高于上带合声波. 图 2(a) 呈现出上下带合声波的磁场功率谱密度随传播角的增大而逐渐减弱的趋势. 准平行传播 (θ<35°) 的合声波磁场功率谱密度比斜传播 (θ>60°) 的合声波高约 2 个数量级. 图 2(b) 则显示, 当 θ<35°时, 随着传播角 θ 的增大, 较强的下带合声波 (>7×10^{-4} $mV^2\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$) 更倾向于出现在较高的频率; 当 θ>35°时, 则反之. 这导致在 θ≈35°附近, 下带合声波存在明显的频谱变窄. 这种频谱变窄在上带合声波中也可以被观测到. 因此, 如图 2(b) 中所标注的, 将合声波强度划分为 4 个区域: 上带准平行区域 (Parallel Upper-band, PU)、上带倾斜区域 (Oblique Upper-band, OU)、下带准平行区域 (Parallel Lower-band, PL) 和下带倾斜区域 (Oblique Lower-band, OL) 来进行讨论. 显然, 在 OL 区域内, 合声波的电场功率谱密度显著高于其他 3 个区域. 最强的波动出现在 f_n = 0.225～0.275, 且传播角在 70°～80°内, 这应该对应于合声波共振锥角的位置[37].

图 3 给出了在不同磁壳数 L 范围内 (分别为

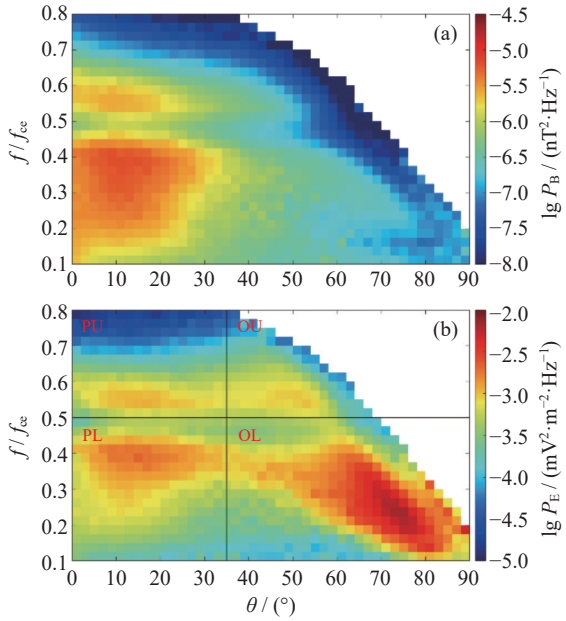


图 2 合声波的平均磁场 (a) 和电场 (b) 功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的分布

Fig. 2 Distribution of the average magnetic field (a) and electric field (b) power spectral density of the chorus in θ-f_n coordinate

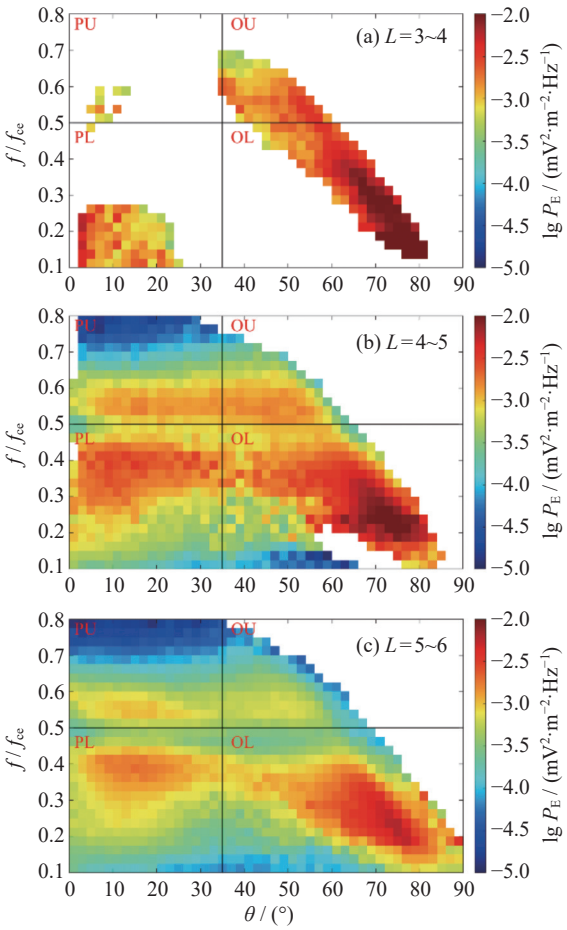


图 3 不同 L 范围内, 合声波电场功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的分布

Fig. 3 Distribution of the electric field power spectrum density of chorus in θ-f_n coordinate within different L

L=3～4, L=4～5, L=5～6) 合声波的电场功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的分布情况. 对于 L=3～4 的范围(见图 3a), 由于合声波通常出现在等离子体层外, 因此合声波只在等离子体层顶被压缩到 L<4 的大磁暴(强对流) 情况下出现, 因此在大部分频率和传播角上的样本数不足. 与其他 L 范围类似, 最强的合声波出现在 OL 区域中 θ=72°～78°, f_n=0.2～0.3 的位置, 该处的电场功率谱密度约为 10^{-2} $mV^2{\cdot}m^{-2}{\cdot}Hz^{-1}$. 在 L=4～5 (见图 3b) 的区域中, 0.5 f_{ce} 处的能量间隙不甚明显, 但在准平行的时候比斜传播时明显. PL 区域的合声波在 f_n=0.2～0.475 范围内, 随着传播角增大, 较强的合声波倾向于出现在较高的频率. OL 区域则反之. 这意味着较强的下带合声波在 θ≈35°处主要出现在 f_n=0.325～0.45 内. 然而这种频谱宽度随传播角的变化在上带合声波中没有被观测到, 因此 PH 与 OU 区域之间没有过渡区域. 图 3(c) 表明, 在 L=5～6 范围内, 合声波电场功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的 4 个区域均弱于图 3(b), 其中 OU 区域最弱, 最强功率谱密度约为 6.3×10^{-4} $mV^2{\cdot}m^{-2}{\cdot}Hz^{-1}$. 但在该 L 范围内, 0.5 f_{ce} 处的能量间隙显著变宽, 且上下带合声波的功率谱密度均在 θ≈35°附近出现显著的减弱和频谱变窄, 其中下带合声波主要集中在 f_n = 0.325～0.4 内.

不同磁地方时 (21:00 MLT－03:00 MLT, 03:00 MLT－09:00 MLT, 09:00 MLT－15:00 MLT, 15:00 MLT－21:00 MLT) 条件下, 合声波的电场功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的分布情况见图 4. 总体而言, 在 21:00 MLT－09:00 MLT 区域内, 合声波电场功率谱密度普遍大于 10^{-3} $mV^2{\cdot}m^{-2}{\cdot}Hz^{-1}$, 明显强于 09:00 MLT－21:00 MLT 区域中的合声波. 在夜侧 (21:00 MLT－03:00 MLT), 上带合声波的平均电场功率谱密度约为 10^{-3} $mV^2{\cdot}m^{-2}{\cdot}Hz^{-1}$, 较强的波动出现在 f_n = 0.525～0.65 时. 下带合声波强度略强于上带, 其平均电场功率谱密度约为 2.5×10^{-3} $mV^2{\cdot}m^{-2}{\cdot}Hz^{-1}$, 如图 4(a) 所示. 在 PL 和 OL 内 θ≈35°附近, 较强的合声波频率范围为 f_n=0.25～0.425. 晨侧 (03:00 MLT－09:00 MLT) 合声波如图 4(b) 所示, 具有与图 4(a) 相似的分布规律. 相比夜侧, 上带合声波较弱, 其平均电场功率谱密度约为 4.7×10^{-4} $mV^2{\cdot}m^{-2}{\cdot}Hz^{-1}$, 且较强的上带合声波频谱变窄, 主要出现在 f_n=0.525～0.6 频率范围内. 另外, 下带合声波的中心频率有下降趋势, θ≈35°处的频谱宽度更大 (f_n=0.2～0.425). 图 4(c) 中, 上午到昏侧 (09:00 MLT－21:00 MLT) 的合声波电场功率谱密度明显降低. 上带合声波平均电场功率谱密度 (7.9×10^{-5} $mV^2{\cdot}m^{-2}{\cdot}Hz^{-1}$) 明显弱于晨侧, 最强的波动出现在 OU 区域 θ=42°～46°且 f_n=0.525～0.55

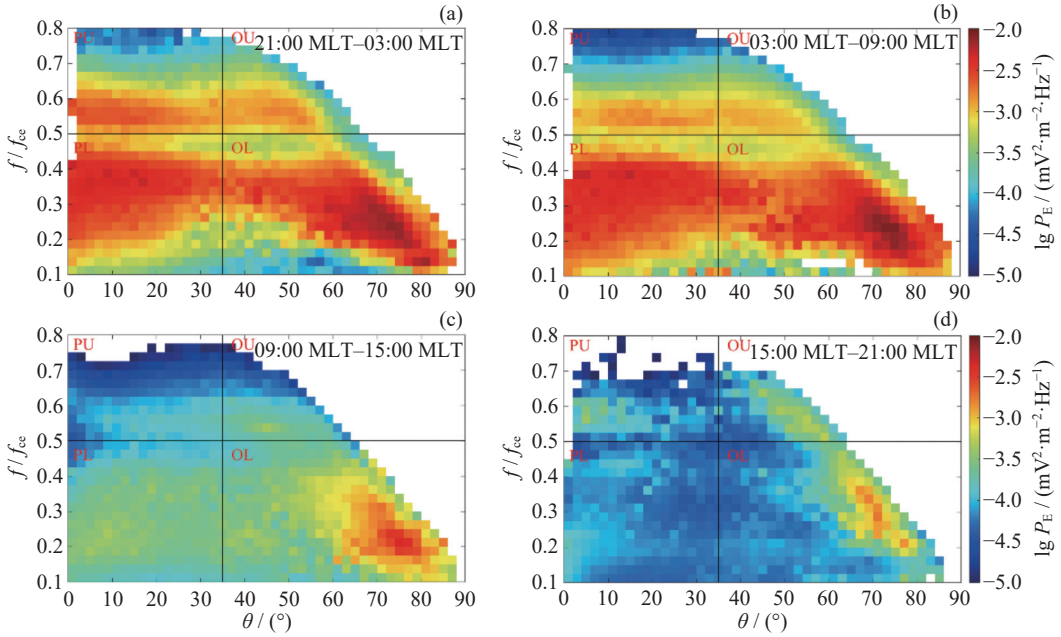


图 4 不同 MLT 范围内合声波电场功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的分布

Fig. 4 Distribution of the electric field power spectrum density of chorus in θ-f_n coordinate within different MLT

的范围内. 对于下带合声波而言, 较强的合声波出现在 θ>60°和 f_n=0.15～0.35 范围内, PL 区域内合声波电场功率谱密度下降至 3.2×10^{-4} $mV^2\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$ 左右. 在昏侧 (15:00 MLT－21:00 MLT), 较强的合声波仅出现在 OL 中传播角大于 60°且靠近共振锥的区域内, 如图 4(d) 所示.

图 5 给出了 $|\lambda_{MLAT}|$<3°, 3°≤$|\lambda_{MLAT}|$<6°, 6°≤$|\lambda_{MLAT}|$<9°和$|\lambda_{MLAT}|$≥9° 四个区域内, 合声波的电场功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的统计分布结果. 从图 5 中可以看出, 随着 λ_{MLAT} 逐渐增大, 上带合声波迅速减弱. 与此同时, θ≈35°附近的下带合声波电场功率谱密度也逐渐减弱, 导致随着磁纬度的增加该处频谱宽度逐渐变窄. 在磁赤道附近 ($|\lambda_{MLAT}|$<3°), 上带合声波的平均功率谱密度约为 4.5×10^{-4} $mV^2\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$, 较强的合声波主要出现在 f_n=0.525～0.6 的频率范围内. 在 PU 和 OU 区域内, 随着传播角的增大, 较强的上带合声波始终出现在 f_n≈0.55 附近. 当 θ<35°时, 较强的下带合声波更倾向于出现在 f_n=0.325～0.425 内, 如图 5(a) 中 PL 区域所示. 但当 θ>35°时则相反, 最强的波动出现在 θ=50°～60°且频率较低的范围 (f_n=0.225～0.325), 见图 5(a) 中的 OL 区域. 因此, 在 θ≈35°附近存在一个下带合声波频谱较窄的过渡区域 (f_n=0.325～0.425). 当 3°≤$|\lambda_{MLAT}|$<6° (见图 5b), 上带合声波电场功率谱密度减弱至约磁赤道附近波动的 0.6 倍, 同时较强波动的频谱范围减小到 f_n=0.525～0.575. 相比图 5(a) 在 PL 区域中, θ<10°且 f_n<0.3 范围内出现较强的合声波. 在 OL 区域内, 最强的合声波向传播角较大 (θ=60°～70°) 的区域扩展. 当磁纬度增加到 6°≤$|\lambda_{MLAT}|$<9° (图 5c) 时, 上带合声波迅速减弱, 最强的波动仅出现在 OU 区域内, 其电场功率谱密度约为 1.6×10^{-4} $mV^2\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$. 另外, 较强的下带合声波在 θ≈35°处的频谱迅速变窄, 其频谱范围 f_n=0.325～0.375. 如图 5(d) 所示, 当$|\lambda_{MLAT}|$≥9°时, 上带合声波的平均电场功率谱密度减弱至约 7×10^{-5} $mV^2\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$. 这表明上带合声波会被局限在磁赤道约 9°以内, 而下带合声波可以出现在高纬度区域. 这与已有研究的统计结果相同[8]. 此外, θ≈35°附近的下带合声波电场功率谱密度减弱至 5×10^{-4} $mV^2\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$, 较强的下带合声波被 θ≈35°分隔开.

3 结语

基于范艾伦探测器 EMFISIS 仪器 2013 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日的观测数据, 对内磁层哨声模合声波进行识别和统计. 分别研究了在不同 L, MLT 和 λ_{MLAT} 区域内合声波电场功率谱密度的频率和传播角分布特征. 主要研究结果如下.

(1) 随着传播角的增大, θ≈35°附近的合声波频谱

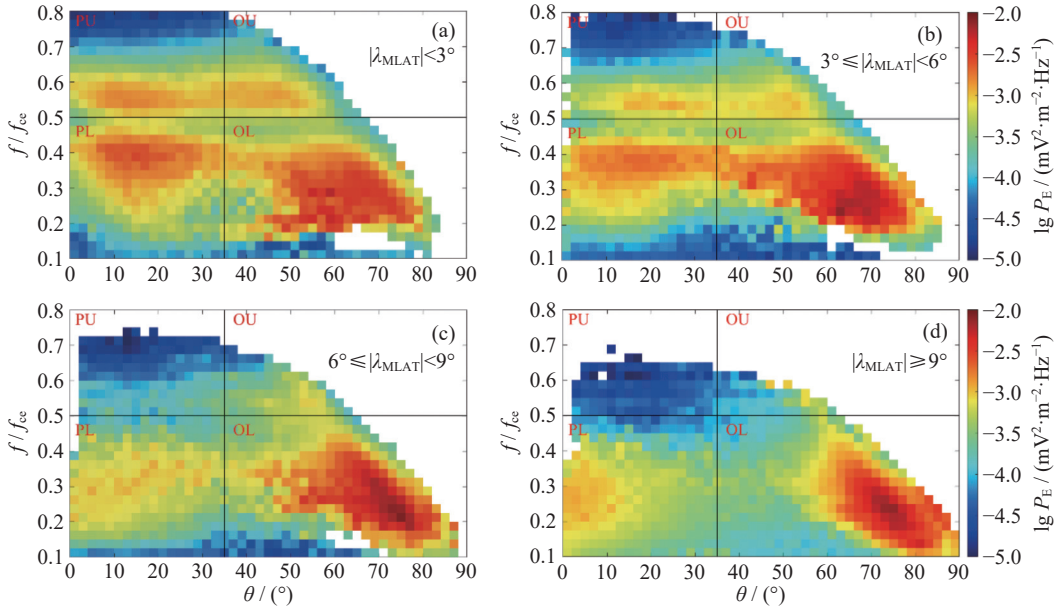


图 5 不同 λ_{MLAT} 范围内, 合声波电场功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的分布

Fig. 5 Distribution of the electric field power spectrum density of chorus in θ-f_n coordinate within different λ_{MLAT}

明显变窄. 这导致在 θ≈35°附近, 较强的合声波倾向于出现在 0.3～0.4 f_{ce} 间较窄的频率范围内. 合声波的电场功率谱密度在 θ-f_n 坐标系中的分布可以被 f_n=0.5 以及 θ≈35°分割为 PU, OU, PL 和 OL 四个区域. 其中 OL 内共振锥角附近的合声波强度显著高于其他三个区域.

(2) 由于在 L<4 时观测到的合声波主要发生在大磁暴期间, 故该范围内的样本数不足. 在 L=4～6 范围内, 随着 L 的增大, 合声波在 0.5 f_{ce} 处的能量间隙以及 θ≈35°处频谱变窄的趋势愈加显著.

(3) 在夜侧和晨侧 (21:00 MLT－09:00 MLT), 合声波被 0.5 f_{ce} 处的能量分割, 同时在 θ≈35°处的频谱宽度变窄, 该现象在晨侧内较为明显. 从上午到昏侧 (09:00 MLT－21:00 MLT) 合声波的电场功率谱密度明显降低, 并且较强的合声波主要为斜传播 (θ>60°) 的下带合声波.

(4) 随着磁纬度增加至$|\lambda_{MLAT}|\geqslant 9°$, 上带合声波迅速减弱. 同时, θ≈35°处的下带合声波也逐渐减弱, 导致该处的频谱宽度逐渐变窄直至将较强的下带合声波完全分隔开.

在合声波与粒子的相互作用中, 波动的频率和传播角起着至关重要的作用. 本文的研究结果揭示了不同 L, MLT 和 λ_{MLAT} 范围内合声波电场功率谱密度随频率和传播角的变化特征. 本文研究结果可为研究合声波的传播过程提供重要的启发, 此外还可为后续构建合声波–电子相互作用的全球精细化模型提供重要的数据支撑.

参考文献

[1] BURTIS W J, HELLIWELL R A. Banded chorus—A new type of VLF radiation observed in the magnetosphere by OGO 1 and OGO 3[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, **74**(11): 3002-3010

[2] HELLIWELL R A. A theory of discrete VLF emissions from the magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, **72**(19): 4773-4790

[3] OMURA Y, KATOH Y, SUMMERS D. Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A4): A04223

[4] SUMMERS D, TANG R X, THORNE R M. Limit on stably trapped particle fluxes in planetary magnetospheres[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A10): A10210

[5] SU Z P, ZHU H, XIAO F L, *et al*. Intense duskside lower band chorus waves observed by Van Allen Probes: Generation and potential acceleration effect on radiation belt electrons[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 4266-4273

[6] AGAPITOV O, ARTEMYEV A, KRASNOSELSKIKH V, *et al*. Statistics of whistler-mode waves in the outer radiation belt: Cluster STAFF-SA measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(6): 3407-3420

[7] TSURUTANI B T, SMITH E J. Two types of magnetospheric ELF chorus and their substorm dependences[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(32): 5112-5128

[8] MEREDITH N P, HORNE R B, ANDERSON R R. Substorm dependence of chorus amplitudes: Implications for the acceleration of electrons to relativistic energies[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A7): 13165-13178

[9] KOONS H C, ROEDER J L. A survey of equatorial magnetospheric wave activity between 5 and 8 R_E[J]. *Planetary and Space Science*, 1990, **38**(10): 1335-1341

[10] LI W, BORTNIK J, THORNE R M, *et al*. Global distribution of wave amplitudes and wave normal angles of chorus waves using THEMIS wave observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A12): A12205

[11] LI W, THORNE R M, ANGELOPOULOS V, *et al*. Global distribution of whistler-mode chorus waves observed on the THEMIS spacecraft[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(9): L09104

[12] TSURUTANI B T, SMITH E J. Postmidnight chorus: a substorm phenomenon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, **79**(1): 118-127

[13] OMURA Y, HIKISHIMA M, KATOH Y, *et al*. Nonlinear mechanisms of lower-band and upper-band VLF chorus emissions in the magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A7): A07217

[14] LIU K J, GARY S P, WINSKE D. Excitation of banded whistler waves in the magnetosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(14): L14108

[15] SUMMERS D, MA C, MEREDITH N P, *et al*. Model of the energization of outer-zone electrons by whistler-mode chorus during the October 9, 1990 geomagnetic storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(24): 2174

[16] THORNE R M, LI W, NI B, *et al*. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus[J]. *Nature*, 2013, **504**(7480): 411-414

[17] SU Z P, XIAO F L, ZHENG H N, *et al*. Nonstorm time dynamics of electron radiation belts observed by the Van Allen Probes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(2): 229-235

[18] XIAO F L, YANG C, HE Z G, *et al*. Chorus acceleration of radiation belt relativistic electrons during March 2013 geo-

magnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(5): 3325-3332

[19] HE Q, LIU S, XIAO F L, *et al*. Observations and parametric study on the role of plasma density on extremely low-frequency chorus wave generation[J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, **65**(11): 2649-2657

[20] HORNE R B, THORNE R M, SHPRITS Y Y, *et al*. Wave acceleration of electrons in the Van Allen radiation belts[J]. *Nature*, 2005, **437**(7056): 227-230

[21] Reeves G D, SPENCE H E, HENDERSON M G, *et al*. Electron acceleration in the heart of the Van Allen radiation belts[J]. *Science*, 2013, **341**(6149): 991-994

[22] TU W, CUNNINGHAM G S, CHEN Y, *et al*. Event-specific chorus wave and electron seed population models in DREAM3D using the Van Allen probes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(5): 1359-1366

[23] SUMMERS D, MA C, MEREDITH N P, *et al*. Modeling outer-zone relativistic electron response to whistler-mode chorus activity during substorms[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, **66**(2): 133-146

[24] SUMMERS D, NI B B, MEREDITH N P. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 2. Evaluation for VLF chorus, ELF hiss, and electromagnetic ion cyclotron waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A4): A04207

[25] XIAO F L, ZONG Q G, CHEN L X. Pitch-angle distribution evolution of energetic electrons in the inner radiation belt and slot region during the 2003 Halloween storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A1): A01215

[26] XIAO F L, SU Z P, ZHENG H N, *et al*. Modeling of outer radiation belt electrons by multidimensional diffusion process[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A3): A03201

[27] MIYOSHI Y, KATOH Y, NISHIYAMA T, *et al*. Time of flight analysis of pulsating aurora electrons, considering wave-particle interactions with propagating whistler mode waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A10): A10312

[28] NISHIMURA Y, BORTNIK J, LI W, *et al*. Identifying the Driver of Pulsating Aurora[J]. *Science*, 2010, **330**(6000): 81-84

[29] THORNE R M. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(22): L22107

[30] GOLDSTEIN B E, TSURUTANI B T. Wave normal directions of chorus near the equatorial source region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1984, **89**(A5): 2789-2810

[31] BRENEMAN A W, KLETZING C A, PICKETT J, *et al*. Statistics of multispacecraft observations of chorus dispersion and source location[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A6): A06202

[32] AGAPITOV O, KRASNOSELSKIKH V, KHOTYAINTSEV Y V, *et al*. Correction to "a statistical study of the propagation characteristics of whistler waves observed by Cluster" [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(24): L24102

[33] LU Q M, KE Y G, WANG X Y, *et al*. Two-dimensional gcPIC simulation of rising-tone chorus waves in a dipole magnetic field[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(6): 4157-4167

[34] KE Y G, GAO X L, LU Q M, *et al*. Deformation of electron distributions due to Landau trapping by the whistler-mode wave[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(3): e2021GL096428

[35] MAUK B H, FOX N J, KANEKAL S G, *et al*. Science objectives and rationale for the radiation belt storm probes mission[J]. *Space Science Reviews*, 2013, **179**(1/2/3/4): 3-27

[36] KURTH W S, DE PASCUALE S, FADEN J B, *et al*. Electron densities inferred from plasma wave spectra obtained by the waves instrument on Van Allen probes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(2): 904-914

[37] LI W O, SANTOLIK J, BORTNIK R M, *et al*. New chorus wave properties near the equator from Van Allen probes wave observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**: 4725-4735

作者简介



杨立贤 男, 2000 年 7 月出生于广东省揭阳市, 现为长沙理工大学物理与电子科学学院硕士研究生, 主要研究方向为地球内磁层等离子体波动.
E-mail: yang_lx@foxmail.com



刘 斯(通信作者) 女, 1984 年出生于湖南省娄底市, 现为长沙理工大学物理与电子科学学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为磁层物理.
E-mail: liusi@csust.edu.cn