

顾旭东, 殷倩, 倪彬彬等. 2017. 基于 Van Allen Probes EMFISIS 波动仪器观测的内磁层下频带哨声合声波全球分布的统计分析. 地球物理学报, 60(4):1249-1258, doi:10.6038/cjg20170401.

Gu X D, Yin Q, Ni B B, et al. 2017. A statistical analysis of the global distribution of inner magnetospheric lower-band chorus waves based on Van Allen Probes EMFISIS observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 60(4):1249-1258, doi:10.6038/cjg20170401.

基于 Van Allen Probes EMFISIS 波动仪器观测的内磁层下频带哨声合声波全球分布的统计分析

顾旭东, 殷倩, 倪彬彬*, 项正, 曹兴, 邹正洋, 周晨, 付松,
石润, 赵正予, 谈家强, 王豪, 郑程耀, 贺丰明

武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430072

摘要 基于 Van Allen Probes 近三年的 EMFISIS 仪器波动观测数据, 对内磁层下频带哨声模合声波幅度的全球分布特性对地磁活动水平的依赖性进行了详细的统计分析, 着重研究下频带合声波平均场强幅度随磁壳值 L 、磁地方时、地磁纬度的分布特征及不同强度区间的合声波的发生概率。结果表明, 下频带合声波的波动强度与地磁活动密切正相关, 处于强磁扰期间的合声波具有更大的振幅, 其发生率与地磁活动强度具有同样的正相关特性。下频带合声波主要发生于午夜至下午的磁地方时区间, 其余的磁地方时时段下频带合声波较弱。赤道面附近的下频带合声波主要分布在夜侧至黎明这一时段内, 随着磁纬度的增加逐步向日侧扩展。下频带合声波在午夜侧(21—03 MLT)主要出现在 15° 的磁纬范围内, 在晨侧(03—09 MLT)可以到达 15° 磁纬甚至更高纬度。下频带合声波主要发生于 $L = \sim 4.5$ 的附近区域。随着地磁活动的增加, 下频带合声波所覆盖的 L -shell 空间区域增大, 趋势为向高、低 L 值区域同时扩展。建立的下频带哨声合声波的全球分布模型将有助于进一步深入理解该重要磁层波动对辐射带电子的波粒作用散射效应和对辐射带动力学过程的定量贡献。

关键词 下频带合声波; 内磁层; 统计分析; 平均场强; 发生率

doi:10.6038/cjg20170401

中图分类号 P353

收稿日期 2016-06-02, 2017-03-10 收修定稿

A statistical analysis of the global distribution of inner magnetospheric lower-band chorus waves based on Van Allen Probes EMFISIS observations

GU Xu-Dong, YIN Qian, NI Bin-Bin*, XIANG Zheng, CAO Xing, ZOU Zheng-Yang,
ZHOU Chen, FU Song, SHI Run, ZHAO Zheng-Yu, TAN Jia-Qiang,
WANG Hao, ZHENG Cheng-Yao, HE Feng-Ming

Department of Space Physics, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract Based on the nearly three-year wave data from the EMFISIS instrument onboard the Van Allen Probes, a statistical analysis of the global distribution of inner magnetospheric lower-

基金项目 国家自然科学基金(41204120, 41304130, 41474141, 41574160), 中国博士后科学基金(2013M542041, 2014T70732, 2015M582265)和国家级大学生创新创业项目(201510486081)联合资助。

第一作者简介 顾旭东, 男, 1979 年生, 副教授, 2011 年获武汉大学博士学位, 主要从事空间等离子体波、辐射带建模及行星磁层波粒相互作用方面的研究。E-mail: guxudong@whu.edu.cn

***通讯作者** 倪彬彬, 男, 1978 年生, 教授, 2005 年获武汉大学博士学位, 主要从事磁层物理、波粒相互作用、辐射带建模、空间天气效应等方面的研究。E-mail: bbni@whu.edu.cn

band chorus is performed in detail with respect to the level of geomagnetic activity. The emphasis is placed on the quantitative variations of average lower-band chorus wave amplitude with L -shell, magnetic local time (MLT) and geomagnetic latitude and the occurrence pattern of lower-band chorus waves at different amplitude levels. The results indicate that there exists a strong positive correlation between the average wave amplitude and the geomagnetic activity level. The lower-band chorus intensifies with increasing geomagnetic activity. The occurrence rates of lower-band chorus also tend to increase when the geomagnetic condition intensifies. Lower-band chorus mainly occur in the MLT sector from midnightside to afternoon, and is generally weak at other MLTs. Near the geomagnetic equator, lower-band chorus is mainly observed during the interval from nightside to dawn and has a MLT extension to dayside at higher magnetic latitudes. Lower-band chorus is mainly confined within 15° of the magnetic latitude around the midnightside (21—03 MLT), while it can propagate to higher latitudes on the dawnside (03—09 MLT). The global profile of lower-band chorus also manifests a strong L -shell dependence, showing the highest probability of the wave occurrence at $L = \sim 4.5$ generally and a much broader coverage during geomagnetically active periods. These results concerning the global distribution and occurrence pattern of lower-band chorus are important to deepen the current understanding of the wave driven scattering effect on radiation belt electrons via wave-particle interactions and of the quantitative contributions to the dynamic behaviors of radiation belt electrons.

Keywords Lower-band chorus; Inner magnetosphere; Statistical analysis; Average wave amplitude; Occurrence rate

1 引言

多年的实验观测与理论研究表明,地球辐射带电子的通量分布及其动态的时空变化和这些电子与磁层等离子体波的波粒相互作用密切联系。其中,处于甚低频频段的哨声合声波既能对辐射带电子进行加速,也能导致后者的散射沉降损失,因此在辐射带电子动力学变化过程中起着至关重要的作用(Thorne, 2010; Albert and Young, 2005; Albert and Shprits, 2009; Horne et al., 2003, 2005; Li et al., 2005; Shprits et al., 2008)。

哨声合声波作为内磁层空间幅度最强的电磁波模之一,位于等离子体层以外,一般不超过 $L \sim 8$ 的空间区域,主要是由 $\sim 10 \sim 100$ keV 电子的各向异性分布激发的波动不稳定性(Li et al., 2010)。磁暴期间哨声合声波的强度明显增强;亚暴期间源电子的注入,也会增强哨声合声波的场强幅度(Meredith et al., 2001, 2003a, 2003b)。作为合声波的一个标志性特征,它的频谱普遍表现为上、下两个频带,在 $0.5f_{ce}$ (这里 f_{ce} 为电子回旋频率)存在能量极小值。合声波在观测上表现为离散的相干瞬态信号,持续时间一般为几秒,频率随时间的变化体现出上升调

($df/dt > 0$)与下降调($df/dt < 0$),这与合声波激发与增长过程中的非线性效应有关。观测也表明,虽然下频带合声波和上频带合声波的主要源区都在磁赤道附近,但表现出不一样的时空分布特征和传播特性。下频带合声波可以在夜侧至午后的磁地方时区间广泛存在,而上频带合声波主要位于夜侧至晨侧这个空间区域。下频带合声波在赤道源区附近主要以场向方向传播,随着传播过程中纬度的提高,波倾角逐渐增大,其中位于日侧的部分波动在中高纬地区能够进入等离子体层,形成嘶声。相对而言,上频带合声波在沿着磁力线传播过程中受朗道衰减的影响很大,所以它存在的地磁纬度范围不大(Li et al., 2007, 2009a, 2009b, 2011)。但是,上频带合声波的波倾角跨度较大,可以从 0° 一直到 40° 、 50° (比如接近 Gendrin angle)。下频带合声波可以与几个 keV 以上的能量电子发生相互作用,已通过观测证实它与脉动极光的生成密切相关,可以存在很好的对应关系,它也被认为是夜侧内磁层与日侧磁层弥散极光的主导生成机制(Ni et al., 2011)。另外,下频带合声波是通过回旋共振散射机制生成辐射带相对论“杀手电子”的核心机制(Summers, 2005; Summers et al., 2004, 2007a, 2007b; Thorne et al., 2007, 2013; Xiao et al., 2009a, 2009b; Meredith et

al., 2006; 李柳元等, 2008). 上频带合声波则主要与 $\sim 0.5 \sim 100$ keV 的能量电子发生作用, 能对 10 keV 以上的电子进行加速, 也能通过投掷角散射使几个 keV 以下的电子进入损失锥, 从而沉降损失到大气层.

细致、准确地模拟磁层合声波对地球辐射带电子分布时空变化的重要影响与贡献, 首先需要获取尽可能详细、全面的哨声合声波全球分布信息. 利用多颗卫星数据, 包括 CRRES、POLAR、CLUSTER、THEMIS, 已有一系列研究对磁层合声波的分布特性进行了详细分析, 取得了众多成果 (Li et al., 2009a, 2011). 而 2012 年发射的 Van Allen Probes 卫星因为携带了更加精密的波动探测仪器, 而且是靠近磁赤道附近的双星大椭圆轨道设计, 为详细、深入研究内磁层 ($L < \sim 6$) 哨声合声波的全球分布提供了最新的一流数据, 从而有利于获取更全面、更合理的磁层合声波的统计分析模型, 进一步更新现有的对磁层合声波全球分布特征的认知. 本文以下频带哨声合声波 ($0.1f_{ce} \sim 0.5f_{ce}$) 为研究对象, 集中于细致分析下频带合声波波幅强度随地磁活动水平的变化特性, 及其与磁壳值 L 、磁地方时 MLT、磁纬 MLAT 之间的关联性, 建立内磁层合声波平均场强与发生率的定量统计模型.

2 数据来源与分析方法

Van Allen Probes 由搭载了完全相同仪器的两颗卫星组成, 于 2012 年 8 月 30 日发射, 迄今已运行 3 年多, 主要用于对地球辐射带空间区域的在轨观测. 卫星穿越地球辐射带的内辐射带与外辐射带, 运行轨道的近地点大约在距离地表 700 km 的高度 ($L \sim 1.1$), 远地点为 $5.8R_{\oplus}$ (R_{\oplus} 为地球半径), 磁倾角约为 10° , 运行周期约为 9 h. Van Allen Probes 与之前用于辐射带探测的卫星相比有两大显著特点: 首先, 拥有 A 和 B 两颗卫星, Van Allen Probes 可以在不同地点对事件进行同时观测; 其次, 卫星仪器种类很多, 能够同时获取观测区域的等离子体、带电粒子、空间波动以及背景磁场等重要信息 (Mauk et al., 2013).

本文数据源自卫星上搭载的 Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science(EMFISIS) 仪器组件 (Kletzing et al., 2013). EMFISIS 提供直流电磁场以及频率范围位于 $10 \text{ Hz} \sim 400 \text{ kHz}$ 的波动电场和磁场谱强度的观测数据. 其中, Waveform

Receiver(WFR) 仪器用来测量频率位于 $10 \text{ Hz} \sim 12 \text{ kHz}$ 的波动功率谱密度, 每 6 s 提供一个完整的频谱矩阵, High-frequency Receiver(HFR) 则提供 $10 \text{ Hz} \sim 400 \text{ kHz}$ 的波动频谱信息 (Li et al., 2013). 以星载磁力计提供的原始数据为基础, 构建平均场向坐标系, 并进行坐标转换, 进而可以使用快速傅里叶算法(FFT) 计算波动磁场的功率谱密度. 由磁场的功率谱密度进行奇异秩分解可以获取极化参数, 包括波倾角和椭圆极化率, 并进一步确定磁层空间各种波模.

哨声合声波一般被认为主要发生于等离子体层层顶以外的区域, 因此首先需要判定卫星观测位置相对于等离子体层层顶的位置. 前人的工作已表明, 依据静电电子回旋谐振波(ECH) 的强度来判定等离子体层层顶的位置是可行的. 如果频率范围为 $1f_{ce} \sim 2f_{ce}$ 的 ECH 波电场振幅小于 $0.0005 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$, 可以判定卫星位于等离子体层层顶以内, 否则卫星位于等离子体层层顶以外 (Meredith et al., 2004). EMFISIS 的 HFR 覆盖了 ECH 所在频段, 因此能否在 HFR 观测到的电场功率谱中找到明显的 ECH 波可以用来判断卫星是否位于等离子体层层顶以外. 由于 L -shell 越大, 能观测到的 ECH 谐波阶数越高, 对应的 f_{ce} 倍数就越大, 本文分成几个不同的空间区域分析波强度: $L < 3.5$ 时, 选取频率段为 $1f_{ce} \sim 2f_{ce}$; $3.5 < L < 4.5$ 时, 选取频率段为 $1f_{ce} \sim 4f_{ce}$; $4.5 < L < 5.5$ 时, 选取频率段为 $1f_{ce} \sim 6f_{ce}$; $L > 5.5$ 时, 选取频率段为 $1f_{ce} \sim 8f_{ce}$. 固定一个频率范围后, 选取对应的最大功率谱密度值的 80% 作为界限, 滤掉低于这个界限的点. 若余下各点的幅度均大于 $10^{-16} (\text{V} \cdot \text{m}^{-1})^2 / \text{Hz}$ 与 5 倍背景噪声谱强度二者的最小值, 则判定为该观测点位于等离子体层层顶外. 通过上面的分析, 可以有效地将 $f < \sim 2 \text{ kHz}$ 的位于等离子体层内的等离子体层嘶声与位于等离子体层外的哨声合声波区分开来, 从而建立一个合理、可靠的内磁层合声波的 Van Allen Probes 观测数据库.

本文的研究对象为下频带哨声合声波, 其对应的频率限定于 $0.1f_{ce} \sim 0.5f_{ce}$. 另外, 作为右旋极化波, 观测到的哨声合声波的椭圆极化率大于 0.5. 磁场功率谱密度在下频带哨声合声波所在频段上进行梯形积分, 可以计算出各个观测时间点下频带合声波的波动磁场振幅, 即波动强度, 进而可以统计分析下频带合声波的波动强度以及发生率的全球分布特征. 选用的 Van Allen Probes 卫星 EMFISIS 数据的时间范围为 2012 年 9 月至 2015 年 5 月, 共计 33 个月.

3 统计分析结果

3.1 下频带合声波的波动强度的全球分布

图 1 给出了在三种不同的地磁活动条件下,下频带磁层合声波的波动强度(由平均场强幅度给出)随 L -shell 和 MLT 的全球统计分析结果。选取的 L -shell 分辨率为 0.25, 磁地方时的分辨率为 1 MLT, 因此将整个地球磁层空间分成了 $24(L) \times 24(\text{MLT})$ 个网格。将前一个小时 AE 指数的平均值定义为 AE^* , 并作为表述地磁活动强弱水平的参数: 当 $\text{AE}^* < 100 \text{ nT}$ 时, 为磁静期; $100 \text{ nT} \leq \text{AE}^* \leq 300 \text{ nT}$ 时, 为中等磁扰期; 当 $\text{AE}^* > 300 \text{ nT}$ 时, 为强磁扰期(比如地磁暴)。在不同的地磁活动条件下, 分别给出下频带合声波的波动强度的全球分布(大图), 以及对应的每个网格内确定的下频带合声波样本个数(小图)。为了保证统计分析的有效性, 我们设定最低的样本个数为 100。若实际观测样本个数低于 100, 则认为统计性不够, 在文中不作考虑。

如图 1 所示, 在 $L=2\sim 6$ 区域内, 绝大部分网格内的有效数据点的样本数大于 100, 最高的可达 $\sim 10^5$ 个, 因此 Van Allen Probes 观测数据可以应用于合声波的统计研究, 其具有很好的统计意义。统计结果表明, 下频带合声波的平均场强幅度与地磁活动条件密切相关。下频带磁层合声波的平均幅度在磁静期和中等磁扰期分别为几 pT 和几十 pT, 但在强磁扰期, 可以高达 100 pT 以上。下频带磁层合声波平均幅度在不同 L -shell 上的分布存在很大的差异性。在外辐射带中心区域, 下频带合声波的幅度较强($>\sim 20 \text{ pT}$), 其他区域相对较弱。随着地磁活动的增强, 较强的合声波分布的 L -shell 区间也随之增加。在磁静期间, 较强的合声波不常见, 但是在中等地磁活动期间, 位于 $L=\sim 5\sim 6$ 的区间内可见, 而在地磁活动强烈的期间, 可以扩展到 $L=\sim 4\sim 6$ 。磁地方时是影响下频带合声波分布的又一个重要因素。统计结果显示, 磁静期间较强的合声波仅仅发生于午夜前和正午之后的一段时间, 与 MLT 不具有明显的关联性, 但是随着地磁活动的增强, 合声波的分布与 MLT 之间呈现出一定的关系, 即在昏侧较弱, 在其他区域可见较强的合声波。

将磁纬度(Magnetic Latitude, MLAT)分成 $|\text{MLAT}| < 5^\circ$, $5^\circ \leq |\text{MLAT}| < 10^\circ$, $10^\circ \leq |\text{MLAT}| < 15^\circ$ 和 $15^\circ \leq |\text{MLAT}| < 20^\circ$ 四个区间范围, 对所得数据作进一步统计分析, 得到下频带磁层合声波的波

动强度在磁纬度上的分布特征。图 2 给出了在三种不同的地磁活动条件下, 不同磁纬度的下频带磁层合声波平均场强幅度在 (L, MLT) 上的统计分析结果。从上到下, 每一行依次代表平静、中等和强烈的地磁活动条件; 从左到右, 每一列依次代表地磁纬度为 $|\text{MLAT}| < 5^\circ$, $5^\circ \leq |\text{MLAT}| < 10^\circ$, $10^\circ \leq |\text{MLAT}| < 15^\circ$ 和 $15^\circ \leq |\text{MLAT}| < 20^\circ$ 。每一组图分别给出下频带磁层合声波平均场强幅度的统计分布结果和对应的有效样本数。统计结果表明, 下频带合声波的分布与地磁纬度的关系, 在不同地磁活动条件下有所不同。在地磁活动平静时期, $|\text{MLAT}| < 10^\circ$ 的区域, $19:00\text{--}24:00$ MLT 时间内, 外辐射带区域可见较强的合声波; 而在 $10^\circ \leq |\text{MLAT}| < 20^\circ$ 的区域, $11:00\text{--}16:00$ MLT 时间内, 较强的合声波主要发生于 $L=\sim 6\sim 7$ 的区域。当地磁活动增强到中等水平的时候, 在赤道附近 $|\text{MLAT}| < 5^\circ$ 的区域, 较强的合声波出现在 $20:00\text{--}06:00$ MLT 的时间内, 主要发生于夜侧; 在 $5^\circ \leq |\text{MLAT}| < 15^\circ$, 较强的合声波可以扩展到日侧, 其 MLT 范围为 $23:00\text{--}18:00$; 当地磁纬度增加到 $15^\circ \leq |\text{MLAT}| < 20^\circ$ 时, 夜侧很少能观测到较强的合声波, 其主要出现在 $04:00\text{--}18:00$ MLT 的时间之内。在地磁扰动期间, 赤道附近 $|\text{MLAT}| < 5^\circ$ 的区域, 较强的合声波可以出现在从夜侧到日侧的上午时段, 随着纬度的增加, 合声波可以出现在除了昏侧附近之外的时间段, 当纬度增加到 $15^\circ \leq |\text{MLAT}| < 20^\circ$ 区域, $16:00\text{--}23:00$ MLT 时间段内, 很少观测到较强的合声波。随着地磁活动水平的增强, 合声波所覆盖的 L -shell 区域明显增大, 这与图 1 所给出的统计结果一致。

根据上述统计结果, 把 MLT 划分为 $21:00\text{--}03:00$, $03:00\text{--}09:00$, $09:00\text{--}15:00$ 和 $15:00\text{--}21:00$ 四个时间段, 然后把每个时间段内的下频带合声波的强度按一定规则进行平均, 得到合声波的强度在 (L, MLAT) 上的二维分布。图 3 给出了在不同的地磁活动条件下, 下频带磁层合声波强度在 (L, MLAT) 上二维分布的全球统计分析结果。图中的曲线表示磁力线, 由偶极子磁场模型获得, 间隔为 $1R_e$ 。直线代表地磁纬度, 从磁赤道(0°)开始间隔 5° 向南北方向排列。选取的 L -shell 的分辨率为 0.1, MLAT 的分辨率为 1° , 因此将整个地球磁层空间分成了 $50(L) \times 40(\text{MLAT})$ 个网格。依据地磁活动水平分类, 把位于给定时段内的每一个网格的下频带合声波的强度进行平均, 得到合声波在 (L, MLAT) 上的二维分布。每一组图分别给出下频带合声波平

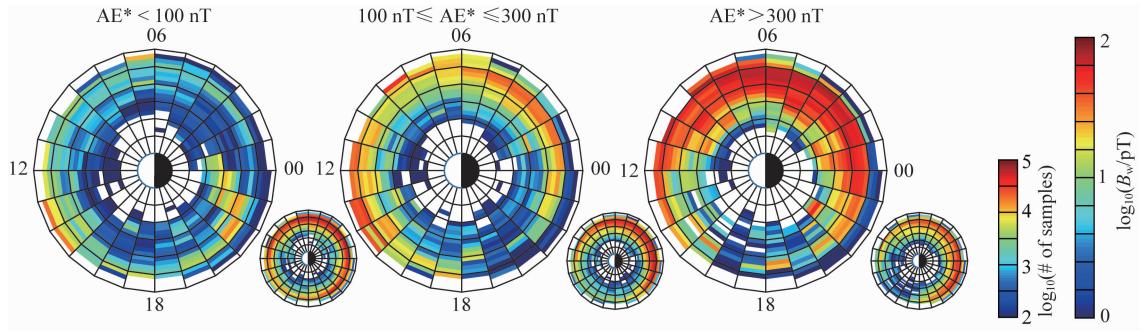


图 1 在三种不同地磁活动条件下,下频带磁层合声波的平均场强幅度与样本数随 L -shell 和磁地方时的全球分布

Fig. 1 Global distribution of averaged wave amplitude and sample number of lower-band chorus as a function of L -shell and magnetic local time (MLT) corresponding to three levels of geomagnetic activity
From left to right: weak, $\text{AE}^* < 100 \text{ nT}$; moderate, $100 \text{ nT} \leq \text{AE}^* \leq 300 \text{ nT}$; active: $\text{AE}^* > 300 \text{ nT}$.

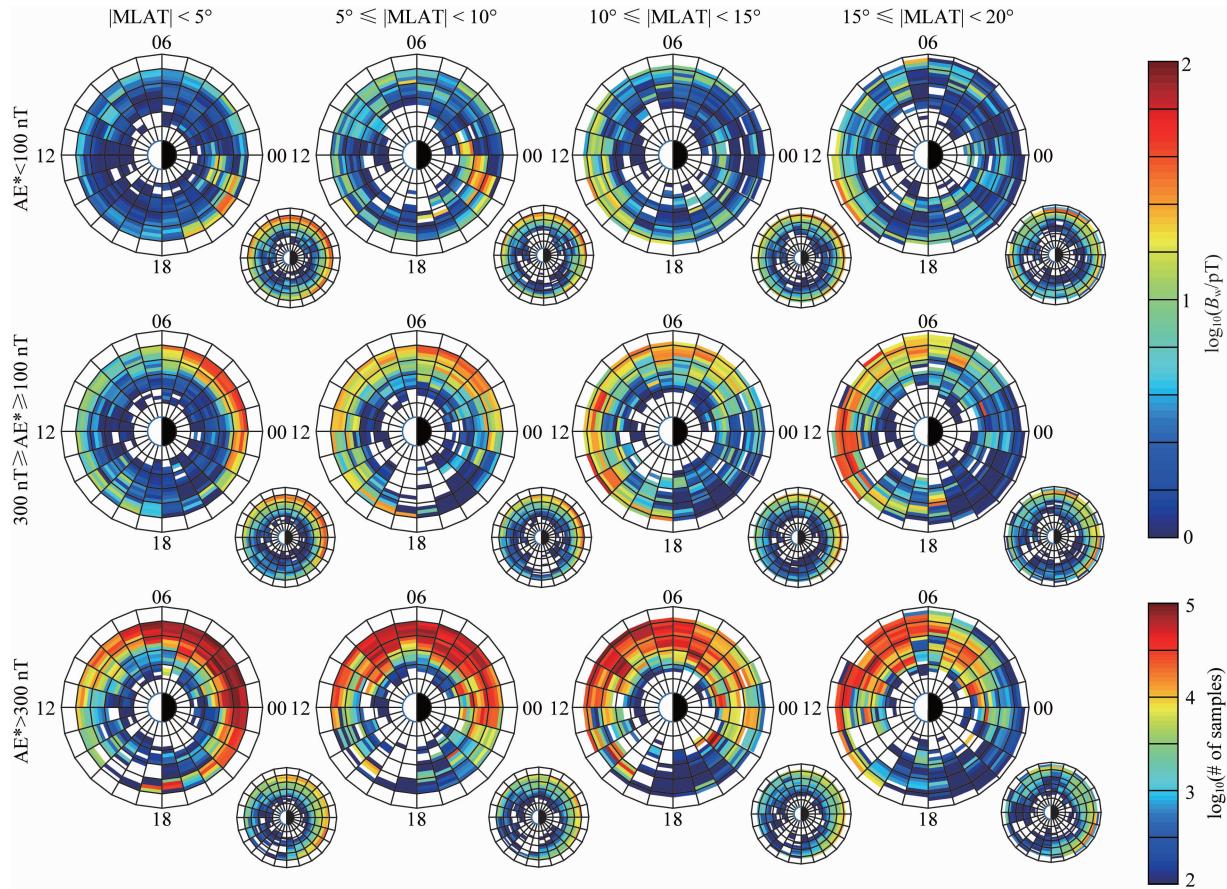
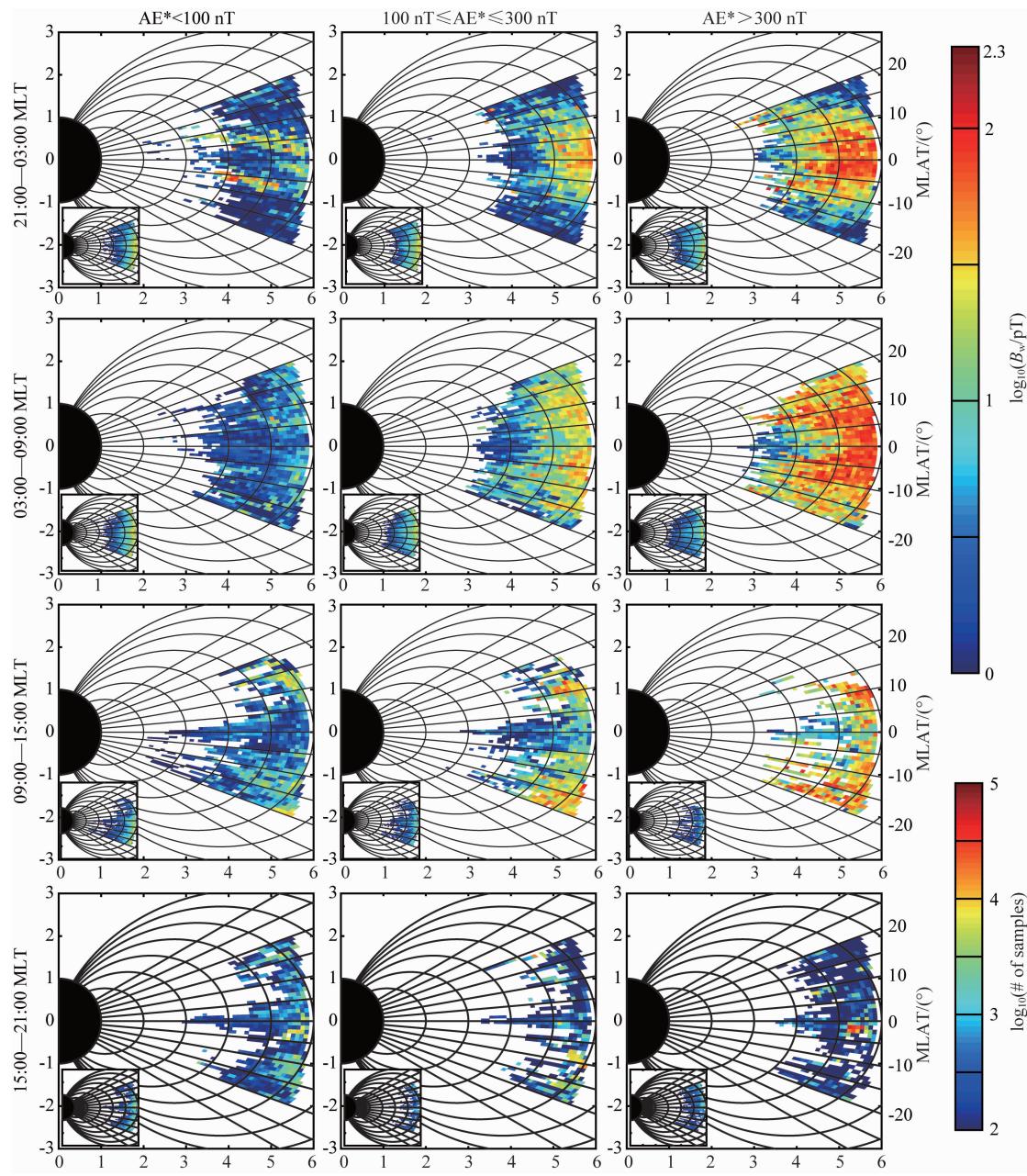


图 2 下频带合声波强度在不同地磁纬度区域,不同地磁活动条件下的统计分布
Fig. 2 Statistical distributions of intensity for lower-band chorus
as a function of magnetic latitude and magnetic activity level

均场强幅度的全球分布(大图)以及对应的有效统计样本数(小图).

图 3 的统计结果揭示,下频带磁层合声波的强度与地磁活动条件密切相关,随着地磁活动的增强,合声波的平均场强幅度显著增大,这一特性与前面的统计结果一致,但是在 15:00—21:00 MLT 时段

内,这一特性不明显.下频带磁层合声波的分布与 MLT 的时段也具有关联性,在不同的时段内具有不同的分布特性.在 03:00—09:00 MLT 时间段内下频带合声波的平均场强幅度最强,分布的纬度和 L -shell 范围最广.在地磁活动强烈时期,较强的下频带合声波可以扩展到 $\sim 20^\circ$ 的磁纬度.在 15:00—

图 3 下频带合声波的平均强度在(L , MLAT)上统计分布Fig. 3 Statistical distribution of intensity for lower-band chorus in (L , MLAT) plane

21:00 MLT, 下频带合声波的平均场强幅度最弱。另外, 也可以看到下频带磁层合声波的平均幅度在不同的 L -shell 上存在很大的差异性。在 21:00—03:00 MLT 和 03:00—09:00 MLT 内, $L = \sim 4.5 \sim 5.9$, 下频带磁层合声波的平均幅度最强; 在 $L = \sim 3.5 \sim 4$, 下频带磁层合声波的平均幅度最弱。下频带合声波的分布还与地磁纬度有关。当地磁活动变强的时候, 在 21:00—03:00 MLT 内, 下频带合声波主要分布在 $|MLAT| < 15^\circ$, 平均场强幅度最强的区域集中于 $|MLAT| < 10^\circ$; 当 03:00—09:00 MLT 时, 下频带合声波主要分布在 $|MLAT| < 20^\circ$, 强的合

声波主要发生在 $|MLAT| < 15^\circ$ 的区域; 在 09:00—15:00 MLT, 下频带合声波在 $|MLAT| > 15^\circ$ 的平均场强幅度最强。

3.2 下频带合声波发生率的全球分布

合声波的发生率定义为给定条件内的数据点数与总的有效数据点数之比, 以百分数的形式给出, 该参量可以反映特定的合声波在地球磁层空间中出现的频率。图 4 给出了下频带合声波在不同地磁活动条件下的发生率随 L -shell 和磁地方时的全球统计分析结果。本文只对强度 $B_w > \sim 10$ pT 合声波的发生率进行统计, 并把平均场强幅度分为三类: 中等幅

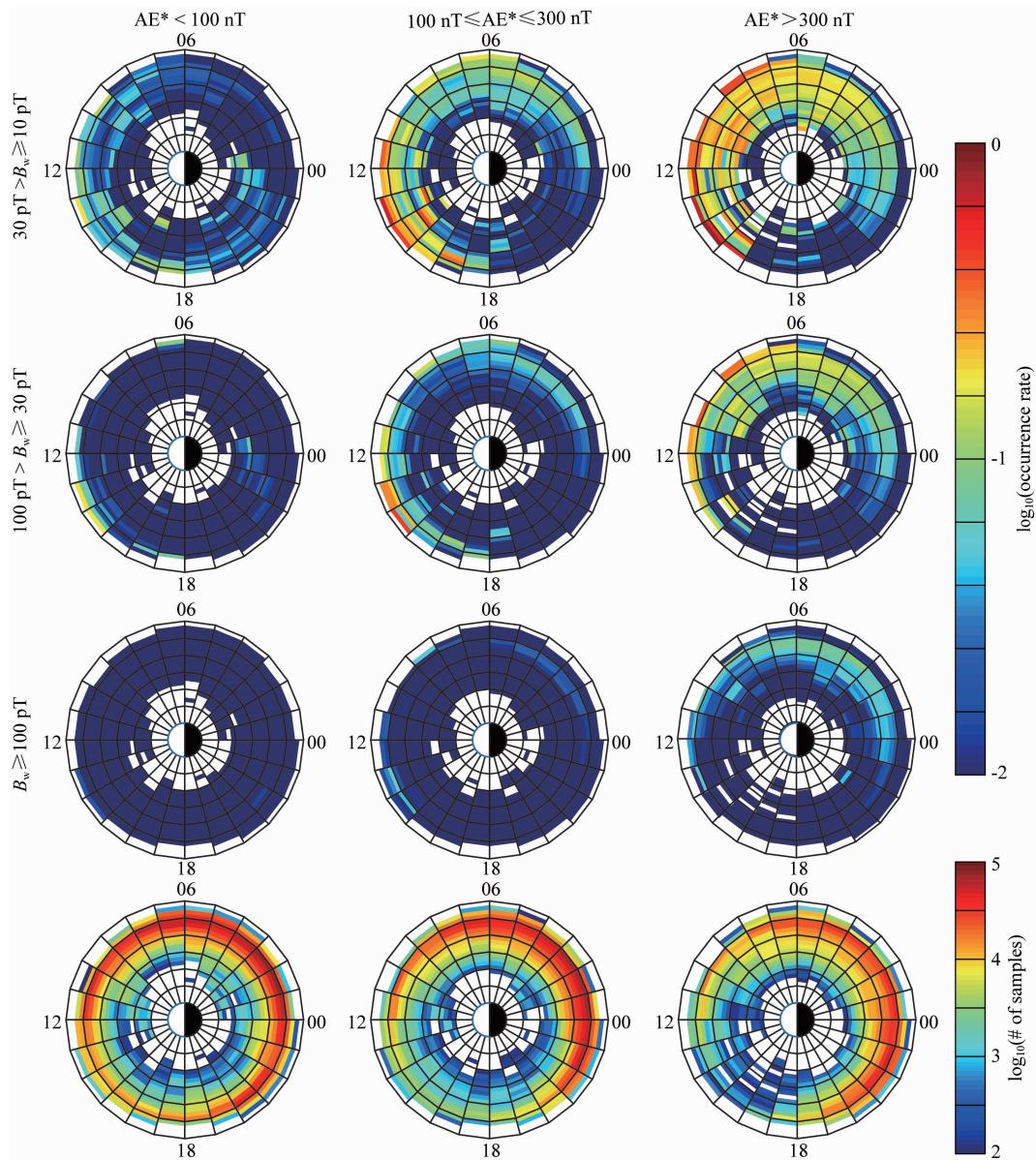


图 4 同强度的下频带合声波发生率随地磁活动指数变化的分布

Fig. 4 Occurrence rates of lower-band chorus with different wave intensity as a function of magnetic activity level

度($10 \text{ pT} \leq B_w < 30 \text{ pT}$)、强幅度($30 \text{ pT} \leq B_w < 100 \text{ pT}$)和极强幅度($B_w \geq 100 \text{ pT}$)。前三行的 9 张图给出下频带磁层合声波发生率的全球分布,第四行的 3 张图是按照地磁活动条件给出的每个网格内的下频带磁层合声波总样本数。右侧上方的色条表示发生率,下方的色条表示样本点数。统计结果表明,下频带磁层合声波的发生率与地磁活动水平呈正相关的特性。在磁平静时期,中等幅度的下频带合声波的发生率约为 4%;在中等磁扰期间,中等幅度的下频带合声波的发生率约为 10%;而在强磁扰期间,中等幅度的下频带合声波的发生率约为 16%。同样的地磁活动条件下,中等幅度的合声波的发生率最大,极强幅度的合声波的发生率最小。下频带合声波的发生

率在不同的 L -shell 上的分布存在差异。在中等磁扰期,中等幅度的下频带磁层合声波在 $L \sim 3 \sim 6$ 均有发生,强幅度的下频带合声波发生在 $L \sim 4.5 \sim 6$,极强幅度的下频带合声波发生在 $L \sim 5 \sim 6$;在强磁扰期,中等幅度及强幅度的下频带磁层合声波在 $L \sim 3 \sim 6$ 均有分布,而极强幅度的下频带合声波只分布在 $L \sim 4.5 \sim 6$ 。下频带合声波的发生率随磁地方时的变化很显著。在磁静期,中等幅度的下频带合声波分布在晨侧至夜侧(07:00—00:00 MLT),强幅度的下频带合声波分布在夜侧(22:00—00:00 MLT),极强幅度的合声波发生率很低;在中等磁扰期,中等幅度的下频带合声波分布在夜侧至昏侧(00:00—17:00 MLT),强幅度的下频带合声波分布在夜侧

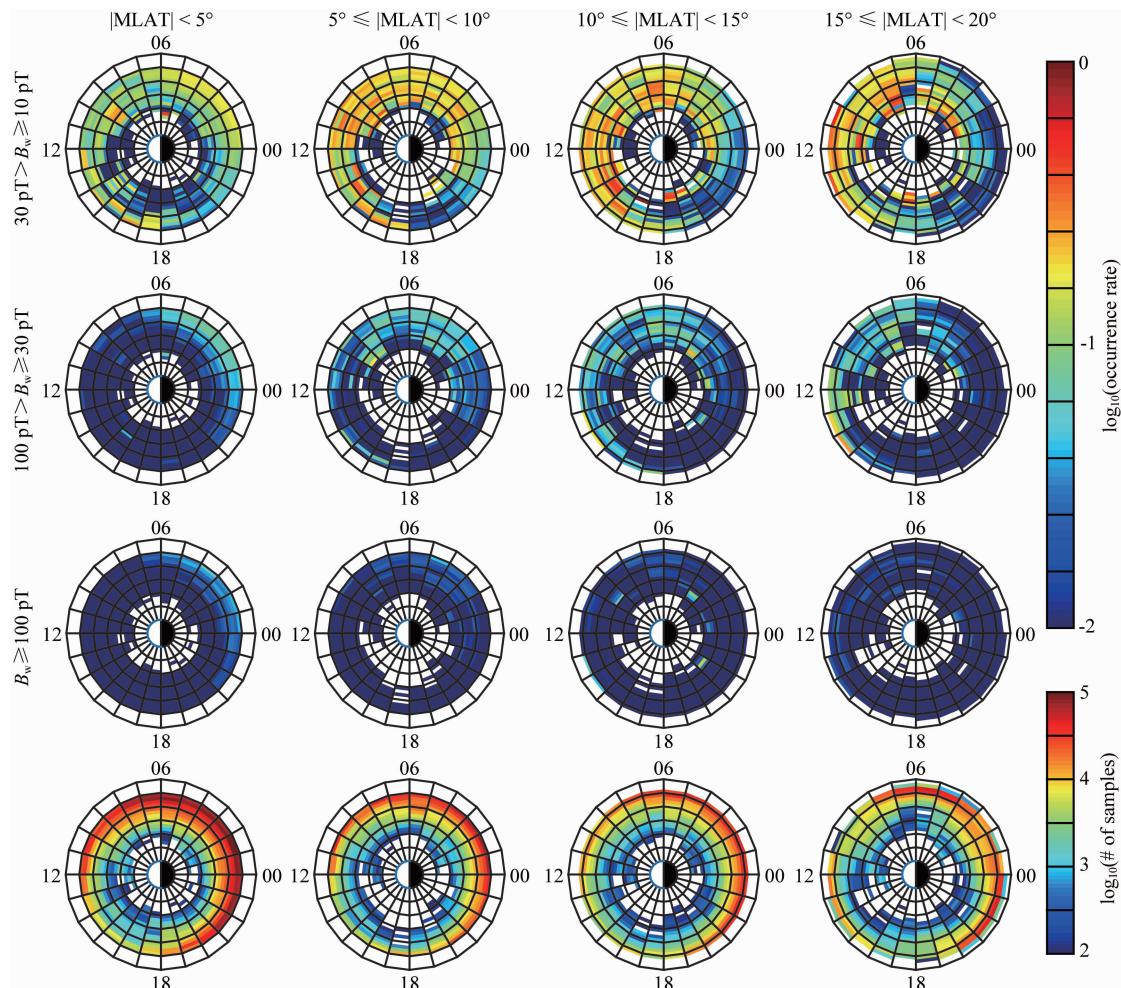


图 5 下频带合声波发生率在不同磁纬度的分布

Fig. 5 Occurrence rates of lower-band chorus with different wave intensity as a function of magnetic latitude

至晨侧(01:00—06:00 MLT)及日侧(10:00—16:00 MLT),极强幅度的下频带合声波分布在夜侧至晨侧(01:00—05:00 MLT);在强磁扰期,中等幅度的下频带磁层合声波在夜侧至午侧(21:00—15:00 MLT)均有分布,在06:00—11:00 MLT发生率最大,强幅度的下频带合声波分布在夜侧至晨侧(23:00—10:00 MLT),在04:00—07:00 MLT发生率最大,极强幅度的下频带合声波在夜侧至晨侧(23:00—07:00 MLT)发生率最大约为6%。

为了进一步分析下频带合声波发生率随磁纬度的变化,本文将磁纬度细分为 $|MLAT| < 5^\circ$ 、 $5^\circ \leq |MLAT| < 10^\circ$ 、 $10^\circ \leq |MLAT| < 15^\circ$ 和 $15^\circ \leq |MLAT| < 20^\circ$ 四个范围,然后对每一个磁纬度区间的数据分别进行发生率的统计分析。图5给出了下频带合声波的发生率随磁纬度的分布,前3行的12张图给出下频带合声波发生率的全球分布,第4行的4张图是对应四个磁纬度范围内的下频带合声波样本的个数。分析统计结果,可以看到中等幅度的下

频带磁层合声波的发生率最高,极强幅度的下频带磁层合声波的发生率最低。下频带合声波的发生率随磁地方时MLT的变化有显著差异。对于中等强度的下频带合声波,在赤道附近,即 $|MLAT| < 5^\circ$ 的区域,夜侧至昏侧(23:00—17:00 MLT)的时段发生率最大,约为10%;在 $5^\circ \leq |MLAT| < 10^\circ$,同样在位于夜侧至午侧(02:00—12:00 MLT)的时段发生率最大,约为16%,相比赤道附近区域有所增加;在 $10^\circ \leq |MLAT| < 15^\circ$,晨侧至午侧(05:00—14:00 MLT)的时段发生率最大,约为16%;在 $15^\circ \leq |MLAT| < 20^\circ$,在晨侧至午侧(06:00—13:00 MLT)的发生率最大,约为16%。对于强幅度的下频带合声波,其最大发生率可达5%~6%,但是发生的时段与地磁纬度有关。在 $|MLAT| < 5^\circ$ 的赤道附近区域,在23:00—05:00 MLT期间发生率最大;在 $5^\circ \leq |MLAT| < 10^\circ$,02:00—08:00 MLT时段发生率最大;在 $10^\circ \leq |MLAT| < 15^\circ$,晨侧至午侧,也就是04:00—13:00 MLT之间发生率最大;而在 $15^\circ \leq |MLAT| < 20^\circ$,06:00—13:00 MLT时段发生率最大。

$|MLAT| < 20^\circ$, 06:00—13:00 MLT 时段内发生率最大。对于极强幅度的下频带合声波,在 $|MLAT| < 5^\circ$ 有分布,但是发生率很低。

4 讨论与结论

利用多颗卫星(包括 CRRES、Polar、CLUSTER、THEMIS)的观测数据,前人对地球磁层哨声模合声波的时空分布特性进行了详细分析(Li et al., 2009a, 2009b, 2010; Meredith et al., 2001, 2003a, 2003b)。但是,由于卫星运行轨道的限制,大部分研究结果更多地针对较高 L 值上(比如 $L > \sim 5$)的波动分布情况。对于 $L < 5$ 的区域,合声波的分布情况还有待进一步研究。2012 年发射的 Van Allen Probes 卫星计划由两颗一模一样的卫星组成,至今在 $L < 5$ 的区域内已有足够的数据积累。卫星携带的 EMFISIS 波动观测仪器能提供高时空分辨率、高频率精度的空间波场数据,将为研究内磁层合声波的全球分布特性与时空变化规律提供一个崭新的契机。本文基于 2012 年 9 月至 2015 年 5 月 Van Allen Probes 卫星的高精度 EMFISIS 波动数据,对内磁层下频带哨声模合声波的全球分布特性进行了详细的统计分析。主要研究结果如下:

(1) 随着地磁活动指数 AE* 的增大,下频带合声波的平均场强幅度增加,其变化的趋势与地磁活动水平呈现出正相关的特性。下频带合声波的发生率与地磁活动强度具有同样的正相关特性。地磁活动强烈时期会出现幅度大于 100 pT 的下频带合声波。

(2) 下频带合声波主要发生于午夜至下午的磁地方时区间,其余的磁地方时时段下频带合声波较弱。磁赤道面附近的下频带合声波主要分布在夜侧至黎明的磁地方时区间。随着地磁纬度的增大,下频带合声波向日侧扩展。

(3) 下频带合声波在午夜侧(21—03 MLT)主要出现在 15° 的磁纬范围内,在晨侧(03—09 MLT)可以到达 15° 磁纬甚至更高纬度,在正午/午后侧(09—15 MLT)分布的磁纬范围变小,可能是因为受到卫星运动轨道的限制,在昏侧/夜间侧基本上所有观测纬度上的合声波发生概率都很低。

(4) 下频带合声波主要发生于 $L = \sim 4.5$ 的附近区域。随着地磁活动的增加,下频带合声波所覆盖的 L -shell 空间区域增大,趋势为向高、低 L 值区域同时扩展。

本文的研究结果进一步深入了解了地球内磁层

下频带合声波全球平均场强分布与不同强度波动的发生概率,一方面将有利于后续开展工作定量研究下频带合声波对辐射带电子的波粒作用散射效应和对辐射带动力学过程的具体贡献,另一方面也将促进对内磁层下频带合声波的激发、增强与传播过程的更细致、全面的理解与分析。

致谢 地磁活动指数数据来自 NASA 的 OMNIWEB 网上数据库(<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow-min.html>),Van Allen Probes 的 EMFISIS 波动数据来自 University of IOWA 研究团队的网上公开数据库(<http://emfisis.physics.uiowa.edu/Flight/>)。

References

- Albert J M, Young S L. 2005. Multidimensional quasi-linear diffusion of radiation belt electrons. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L14110, doi: 10.1029/2005GL023191.
- Albert J M, Shprits Y Y. 2009. Estimates of lifetimes against pitch angle diffusion. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 71(16): 1647–1652, doi: 10.1016/j.jastp.2008.07.004.
- Horne R B, Glauert S A, Thorne R M. 2003. Resonant diffusion of radiation belt electrons by whistler-mode chorus. *Geophys. Res. Lett.*, 30(9): 1493, doi: 10.1029/2003GL016963.
- Horne R B, Thorne R M, Glauert S A, et al. 2005. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves. *J. Geophys. Res.*, 110: A03225, doi: 10.1029/2004JA010811.
- Kletzing C A, Kurth W S, Acuna M, et al. 2013. The electric and magnetic field instrument suite and integrated science (EMFISIS) on RBSP. *Space Sci. Rev.*, 179(1-4): 127–181, doi: 10.1007/s11214-013-9993-6.
- Li L Y, Cao J B, Zhou G C. 2005. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit. *J. Geophys. Res.*, 110: A03203, doi: 10.1029/2004JA010628.
- Li L Y, Cao J B, Zhou G C. 2008. Whistler-mode waves modify the high-energy electron slot region and the outer radiation belt. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(2): 316–324.
- Li W, Shprits Y Y, Thorne R M. 2007. Dynamic evolution of energetic outer zone electrons due to wave-particle interactions during storms. *J. Geophys. Res.*, 112: A10220, doi: 10.1029/2007JA012368.
- Li W, Thorne R M, Angelopoulos V, et al. 2009a. Global distribution of whistler-mode chorus waves observed on the THEMIS spacecraft. *Geophys. Res. Lett.*, 36: L09104, doi: 10.1029/2009GL037595.
- Li W, Thorne R M, Angelopoulos V, et al. 2009b. Evaluation of whistler-mode chorus intensification on the nightside during an injection event observed on the THEMIS spacecraft. *J. Geophys. Res.*, 114: A00C14, doi: 10.1029/2008JA013554.
- Li W, Thorne R M, Nishimura Y, et al. 2010. THEMIS analysis of

- observed equatorial electron distributions responsible for the chorus excitation. *J. Geophys. Res.*, 115: A00F11, doi: 10.1029/2009JA014845.
- Li W, Bortnik J, Thorne R M, et al. 2011. Global distribution of wave amplitudes and wave normal angles of chorus waves using THEMIS wave observations. *J. Geophys. Res.*, 116, A12205, doi: 10.1029/2011JA017035.
- Li W, Thorne R M, Bortnik J, et al. 2013. An unusual enhancement of low-frequency plasmaspheric hiss in the outer plasmasphere associated with substorm-injected electrons. *Geophys. Res. Lett.*, 40(15): 3798-3803.
- Mauk B H, Fox N J, Kanekal S G, et al. 2013. Science objectives and rationale for the Radiation Belt Storm Probes mission. *Space Sci. Rev.*, 179(1-4): 3-27, doi: 10.1007/s11214-012-9908-y.
- Meredith N P, Horne R B, Anderson R R. 2001. Substorm dependence of chorus amplitudes: implications for the acceleration of electrons to relativistic energies. *J. Geophys. Res.*, 106(A7): 13165-13178.
- Meredith N P, Cain M, Horne R B, et al. 2003a. Evidence for chorus-driven electron acceleration to relativistic energies from a survey of geomagnetically disturbed periods. *J. Geophys. Res.*, 108: 1248, doi: 10.1029/2002JA009764.
- Meredith N P, Horne R B, Thorne R M, et al. 2003b. Favored regions for chorus-driven electron acceleration to relativistic energies in the Earth's outer radiation belt. *Geophys. Res. Lett.*, 30(16): 1871, doi: 10.1029/2003GL017698.
- Meredith N P, Horne R B, Thorne R M, et al. 2004. Substorm dependence of plasmaspheric hiss. *J. Geophys. Res.*, 109, A06209, doi: 10.1029/2004JA010387.
- Meredith N P, Horne R B, Glauert S A, et al. 2006. Energetic outer zone electron loss timescales during low geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, 111: A05212, doi: 10.1029/2005JA011516.
- Ni B B, Thorne R M, Meredith N P, et al. 2011. Resonant scattering of plasma sheet electrons leading to diffuse auroral precipitation: 2. Evaluation for whistler mode chorus waves. *J. Geophys. Res.*, 116: A04219, doi: 10.1029/2010JA016233.
- Shprits Y Y, Subbotin D A, Meredith N P, et al. 2008. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belts: II. Local acceleration and loss. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 70(14): 1694-1713, doi: 10.1016/j.jastp.2008.06.014.
- Summers D. 2005. Quasi-linear diffusion coefficients for field-aligned electromagnetic waves with applications to the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 110, A08213, doi: 10.1029/2005JA011159.
- Summers D, Ma C, Meredith N P, et al. 2004. Modeling outer-zone relativistic electron response to whistler-mode chorus activity during substorms. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 66(2): 133-146.
- Summers D, Ni B B, Meredith N P. 2007a. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 1. Theory. *J. Geophys. Res.*, 112: A04206, doi: 10.1029/2006JA011801.
- Summers D, Ni B B, Meredith N P. 2007b. 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. Geophys. Res.*, 112: A04207, doi: 10.1029/2006JA011993.
- Thorne R M, Shprits Y Y, Meredith N P, et al. 2007. Refilling of the slot region between the inner and outer electron radiation belts during geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 112: A06203, doi: 10.1029/2006JA012176.
- Thorne R M. 2010. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L22107, doi: 10.1029/2010GL044990.
- Thorne R M, Li W, Ni B, et al. 2013. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus. *Nature*, 504(7480): 411-414, doi: 10.1038/nature12889.
- Xiao F L, Zong Q G, Chen L X. 2009a. Pitch-angle distribution evolution of energetic electrons in the inner radiation belt and slot region during the 2003 Halloween storm. *J. Geophys. Res.*, 114: A01215, doi: 10.1029/2008JA013068.
- Xiao F L, Su Z P, Zheng H N, et al. 2009b. Modeling of outer radiation belt electrons by multidimensional diffusion process. *J. Geophys. Res.*, 114: A03201, doi: 10.1029/2008JA013580.

附中文参考文献

李柳元, 曹晋演, 周国成. 2008. 哨声模波对高能电子槽区和外辐射带的调节作用. 地球物理学报, 51(2): 316-324.

(本文编辑 何燕)