

顾旭东, 殷倩, 周若贤等. 2017. 基于 Van Allen Probes EMFISIS 波动仪器观测的内磁层上频带哨声合声波全球分布的统计分析. 地球物理学报, 60(4):1259-1267, doi:10.6038/cjg20170402.

Gu X D, Yin Q, Zhou R X, et al. 2017. A statistical analysis of the global distribution of inner magnetospheric upper-band chorus waves based on Van Allen Probes EMFISIS observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 60(4):1259-1267, doi:10.6038/cjg20170402.

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

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

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, 针对内磁层上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, 着重研究上频带合声波平均场强幅度随磁壳值(L)、磁地方时(MLT)、地磁纬度(MLAT)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, 上频带合声波的平均场强幅度与地磁活动条件密切相关, 在强磁扰期, 平均幅度可达到 40 pT 以上。在外辐射带中心区域($L=4\sim 6$), 上频带合声波的幅度最强; 在 $L < \sim 3$ 的区域, 上频带磁层合声波没有分布。在夜侧至晨侧(22—09 MLT), 上频带合声波幅度最强; 在下午侧至昏侧(15—19 MLT), 上频带合声波幅度最弱; 日侧(10—14 MLT)上频带合声波在不同地磁活动条件下都存在, 幅度偏小。上频带合声波主要分布在 $|MLAT| < 10^\circ$, 其中 21—09 MLT 范围内、磁纬位于 $|MLAT| < 5^\circ$ 的平均场强幅度最强, 磁扰期间可达约 100 pT。另外, 统计而言, 中等幅度(10~30 pT)的上频带合声波在夜侧至晨侧(23—09 MLT)靠近磁赤道区域的发生率最高, 可达 15% 左右。强幅度(> 30 pT)的上频带合声波普遍分布在夜侧(01—05 MLT), 发生率最小。本文建立的上频带哨声模合声波的全球分布模型结合已经建立的下频带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等离子体波动对地球等离子体片、辐射带、环电流动力学过程的定量贡献。

关键词 上频带合声波; 内磁层; 统计分析; 平均场强; 发生率

doi:10.6038/cjg20170402

中图分类号 P353

收稿日期 2016-07-02, 2017-02-20 收修定稿

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

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

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

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, 2011 年获武汉大学博士学位, 现为副教授, 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, 2005 年获武汉大学博士学位, 教授, 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

Van Allen Probes, a statistical analysis of the global distribution of inner magnetospheric upper-band chorus is performed in detail with respect to the level of geomagnetic activity. The emphasis is placed upon the quantitative variations of average upper-band chorus wave amplitude with L -shell (L), magnetic local time (MLT) and magnetic latitude (MLAT) and the occurrence pattern of upper-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, and the averaged wave amplitude can be larger than 40 pT during geomagnetically active periods. While wave amplitude reaches the maximum in the central region ($L=4\sim6$) of outer radiation belt, upper-band chorus cannot be observed at $L<\sim3$. Averaged wave amplitude is found to be strongest during the interval from nightside to dawnside and is weakest during the interval from afternoonside to duskside. Dayside upper-band chorus can be observed at different geomagnetical conditions with relatively small wave amplitude. It is found that upper-band chorus is mainly distributed at $|MLAT|<10^\circ$. Averaged wave amplitude is strongest in the region of 21—09 MLT and $|MLAT|<5^\circ$, and can be about 100 pT during geomagnetically active periods. In addition, the occurrence rate of moderate amplitude (10~30 pT) upper-band chorus is statistically found to be highest ($\sim 15\%$) near the equatorial region in the MLT sector from nightside to dawnside (23—09 MLT). Upper-band chorus with strong wave amplitude has the lowest occurrence rate and is generally observed at the nightside (01—05 MLT). Combined with the global distribution and occurrence pattern of lower-band chorus we have already established, the global distribution and occurrence pattern of upper-band chorus established in this study will improve the understanding of the quantitative contributions of this important magnetospheric wave to the dynamic behaviors of the Earth's plasma sheet, radiation belts and ring current.

Keywords Upper-band chorus; Inner magnetosphere; Statistical analysis; Averaged wave amplitude; Occurrence rate

1 引言

哨声模合声波作为内磁层空间幅度最强的电磁波模之一,它的一个标志性特征就是频谱普遍表现为上、下两个频带,在 $0.5f_{ce}$ (f_{ce} 为电子回旋频率) 存在能量极小值。虽然下频带合声波被认为是导致辐射带高能电子和脉动极光电子沉降的主要机制,上频带合声波则认为是弥散极光电子沉降的主要机制。Inan 等(1992)和 Johnstone 等(1993)研究表明,几个千毫伏能量的电子主要与上频带合声波发生共振。Ni 等(2008; 2011)的定量计算表明,磁暴期间的上频带合声波能够对损失锥附近几个千毫伏以下电子产生强烈的投掷角散射,甚至可以接近“强散射”(strong diffusion)极限。Thorne 等(2010)的详细研究明确指出,上频带合声波在小投掷角能够与几十毫伏至约 5 keV 的电子发生快速的投掷角散射,随着投掷角的增大,投掷角散射效果更明显作用于更高能量电子。同时,上频带合声波能够对约

2~3 keV 和几十千毫伏的电子产生强烈的能量散射效果。因此,上频带合声波可以用来解释几个千毫伏左右电子的“烤饼”(pancake)分布,也能导致大于 10 keV 电子的加速进而增强这些能量电子的投掷角各向异性分布。

Meredith 等(2001; 2009)利用 CRRES 卫星数据对上频带合声波做了详细的统计分析,发现上频带合声波主要存在于 $L=4\sim7$ 和 $MLT=21\sim06$ 的背日侧空间区域,场强幅度大于 $1 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ 的发生概率大约为 6%。上频带合声波的幅度大小与地磁活动强弱存在明显的正相关联系。Li 等(2009a; 2009b; 2011)使用 THEMIS 的观测数据对磁层上频带和下频带合声波做了详细的分析,给出了合声波的波动强度分布和发生概率,其分布与 Lshell、MLT、MLAT 以及地磁活动指数 AE* 有关。他们的工作为研究上频带合声波对磁层粒子动力学过程的影响提供了重要的模型基础和输入参数依据。2012 年下半年发射的 Van Allen Probes 探测双星为研究地球磁层空间等离子体波动包括哨声模合声波提

供了最新的一流观测数据,有利于进一步加深对现有空间波动特性以及波动模型可靠性的认知。本文以上频带哨声模合声波($0.5 \sim 0.8 f_{ce}$)为研究对象,集中于细致分析上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,建立相应的波动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

本文分析的数据源自 Van Allen Probes 卫星上搭载的波动电场和磁场测量仪器组件(EMFISIS)。该组件包括测量频率位于 $10 \text{ Hz} \sim 12 \text{ kHz}$ 波动功率谱密度的仪器(WFR)和提供 $10 \text{ Hz} \sim 400 \text{ kHz}$ 波动频谱信息的仪器(HFR)。对这些高质量的波场数据进行处理与分析,则可以得到波动电磁场的功率谱密度与极化参数,包括波倾角和椭圆极化率,从而进一步确定空间波模(Mauk et al., 2012; Kletzing et al., 2012; Li et al., 2013)。

由于哨声波合声只位于等离子体层层顶以外的空间区域,因此本文首先基于前人的工作,利用静电电子回旋谐振波(ECH)的电场振幅强度来判断卫星观测位置位于等离子体层层顶以外或以内。具体方法为:若频率范围为 $1 \sim 2 f_{ce}$ 的 ECH 波幅度小于 $0.0005 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$,则可以判断位于等离子体层层顶以内;反之,则位于等离子体层层顶以外(Meredith et al., 2004)。由于 L -shell 越大,能观测到的 ECH 谐次波越多,对应的 f_{ce} 倍数就越大,因此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 $1 \sim 2 f_{ce}$; $3.5 < L < 4.5$ 时,选取频率段为 $1 \sim 4 f_{ce}$; $4.5 < L < 5.5$ 时,选取频率段为 $1 \sim 6 f_{ce}$; $L > 5.5$ 时,选取频率段为 $1 \sim 8 f_{ce}$ 。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 $10^{-16} (\text{V/m})^2/\text{Hz}$ 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波合声区分开来,从而建立一个合理、可靠的磁层哨声模合声波的 Van Allen Probes 观测数据库。

本文的分析集中于上频带哨声波合声,对应的频率为 $0.5 \sim 0.8 f_{ce}$ 。另外,作为右旋极化波,观测到的哨声波合声椭圆极化率也限定为大于 0.5。对于

位于上频带合声波的磁场功率谱密度进行梯形积分,可以计算出位于等离子体层外的各个观测时间点上频带合声波的波动场强幅度,进而可以统计分析上频带合声波场强幅度以及发生率的全球分布特征。本文选用的 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 上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上频带磁层合声波平均场强幅度随 L -shell 和磁地方时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 1MLT,因此将整个地球磁层空间分成了 $24(L) \times 24(\text{MLT})$ 个网格。另外,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)。对于图中的每种地磁活动条件,小图给出每个网格内确定的上频带合声波样本个数。为了保证统计分析的可靠性,我们设定最低的样本个数为 100。若样本个数低于 100,则认为统计性不够,在文中不作考虑。大图则给出上频带合声波平均场强幅度的全球分布。右侧较高的色条表征波动平均场强幅度;较低的色条表征样本点数。首先,可以明显看到上频带合声波的平均场强幅度与地磁活动条件密切相关。上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 和十几 pT;在强磁扰期,可以达到 40 pT 以上。另外,也可以看到上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。一般而言,在外辐射带中心区域(L 约为 4.0~6.0),上频带合声波的幅度最强;在约 $L < 3$ 的区域,上频带磁层合声波没有分布。最后,上频带合声波平均幅度随磁地方时的变化也很显著。统计而言,在夜侧至晨侧(22—09MLT),上频带合声波幅度最强;在下午侧至昏侧(15—19MLT),上频带合声波幅度最弱。

为了进一步统计分析在三种不同的地磁活动条件下上频带磁层合声波的平均场强幅度在磁纬度上的分布特征,将磁纬度(magnetic latitude,即 MLAT)分成 $| \text{MLAT} | < 5^\circ$ 、 $5^\circ \leq | \text{MLAT} | < 10^\circ$ 、 $10^\circ \leq | \text{MLAT} | < 15^\circ$ 、 $15^\circ \leq | \text{MLAT} | < 20^\circ$ 四个范围。图 2 给出了在三种不同的地磁活动条件下上频带磁层合

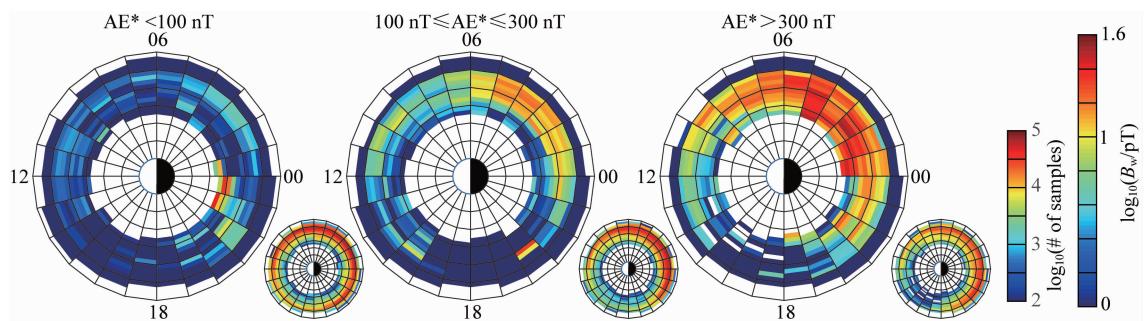


图 1 在三种不同地磁活动条件下,上频带磁层合声波的平均场强幅度与样本数随 L -shell 和磁地方时的全球分布

Fig. 1 Global distribution of (larger panels) averaged wave amplitude and (smaller panels) sample number of upper-band chorus as a function of L -shells 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: $\text{AE}^* > 300 \text{ nT}$)

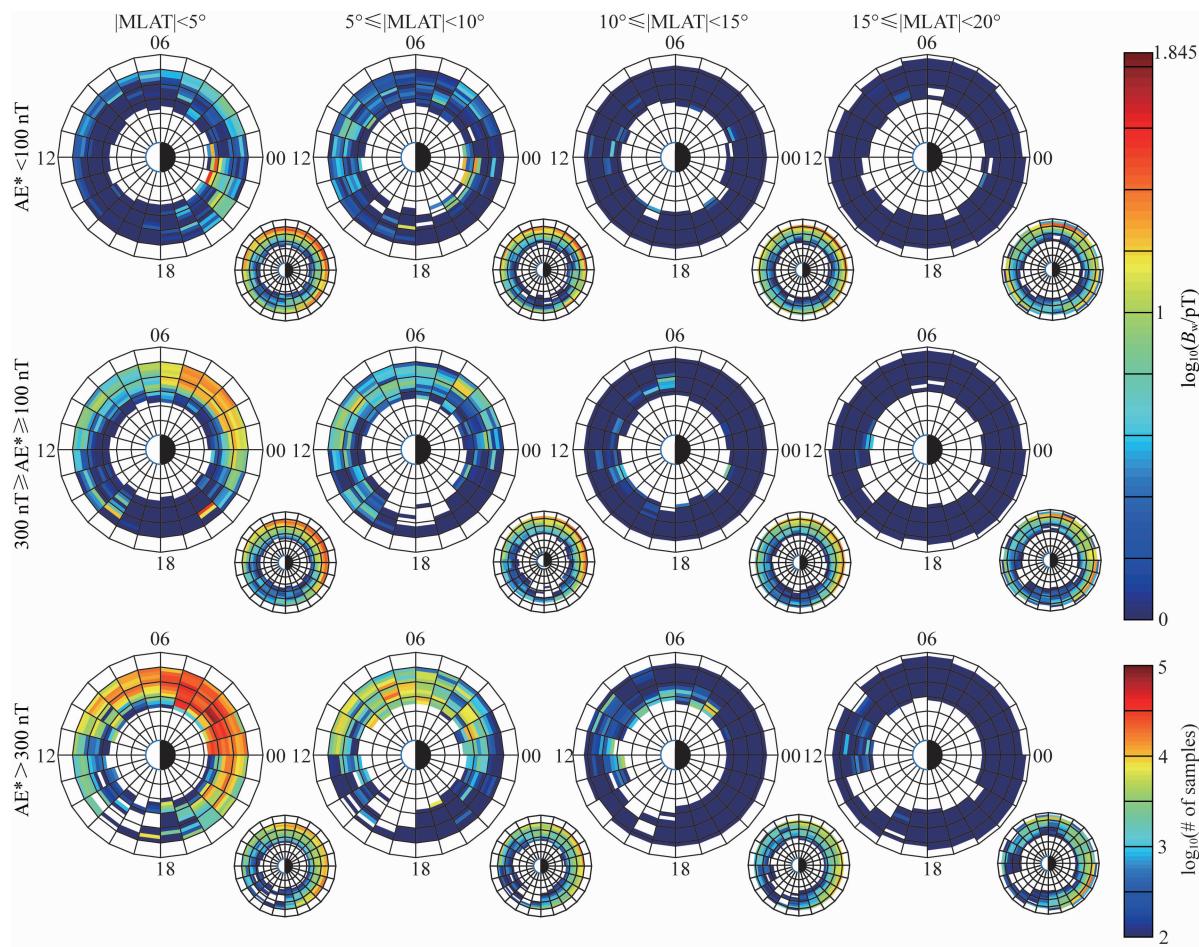


图 2 上频带合声波强度在不同地磁纬度区域,不同地磁活动条件下的统计分布

Fig. 2 The statistical distributions of intensity for upper-band chorus, as a function of magnetic latitude and magnetic activity level

声波平均场强幅度随 L -shell 和磁地方时的基于不同磁纬度的全球统计分析结果。对于图中的每种地磁活动条件和磁纬度范围,小图给出每个网格内确定的上频带磁层合声波样本个数,最低样本个数设为 100。大图给出上频带磁层合声波平均场强幅度

的全球分布。右侧上方的色条表征波动平均场强幅度;下方的色条表征样本点数。上频带磁层合声波在不同的磁纬度范围内的分布存在很大的差异性。磁纬度 $|\text{MLAT}| < 5^\circ$ 时,磁静期, L 约为 5~6 时上频带磁层合声波平均幅度最强,在夜侧至晨侧(21—

05MLT) 上频带合声波平均幅度最强; 中等磁扰期, L 约为 4~6 时上频带合声波平均幅度最强, 在夜侧至晨侧(23—05MLT) 上频带合声波平均幅度最强; 强磁扰期, L 约为 3.5~6 时上频带合声波平均幅度最强, 在夜侧至晨侧(23—06MLT) 上频带合声波平均幅度最强。磁纬度 $5^\circ \leq |MLAT| < 10^\circ$ 时, 磁静期, L 约为 4~6 时平均幅度最强, 在夜侧至午侧(02—13MLT) 平均幅度最强; 中等磁扰期, L 约为 3.5~6 时上频带合声波的平均幅度最强, 在夜侧至午侧(00—12MLT) 平均幅度最强; 强磁扰期, L 约为 3~6 时, 在夜侧至午侧(01—11MLT) 平均幅度最强。

磁纬度 $10^\circ \leq |MLAT| < 15^\circ$ 时, 磁静期上频带合声波几乎没有分布, 中等磁扰期及强磁扰期在夜侧至午侧(06—12MLT) 的平均幅度最强。磁纬度 $15^\circ \leq |MLAT| < 20^\circ$ 时, 磁静期和中等磁扰期几乎没有分布, 强磁扰期在晨侧至午侧(09—12MLT) 上频带磁层合声波的平均幅度最强。

为了更直观的表述上频带磁层合声波的平均场强幅度随磁纬度的分布情况, 图 3 给出了在不同的地磁活动条件下上频带磁层合声波随 L -shell 和 $MLAT$ 的全球统计分析结果。图中的闭合曲线表示磁力线, 是依据地球磁场磁力线方程 $r = r_0 \cos^2 \lambda (r_0$

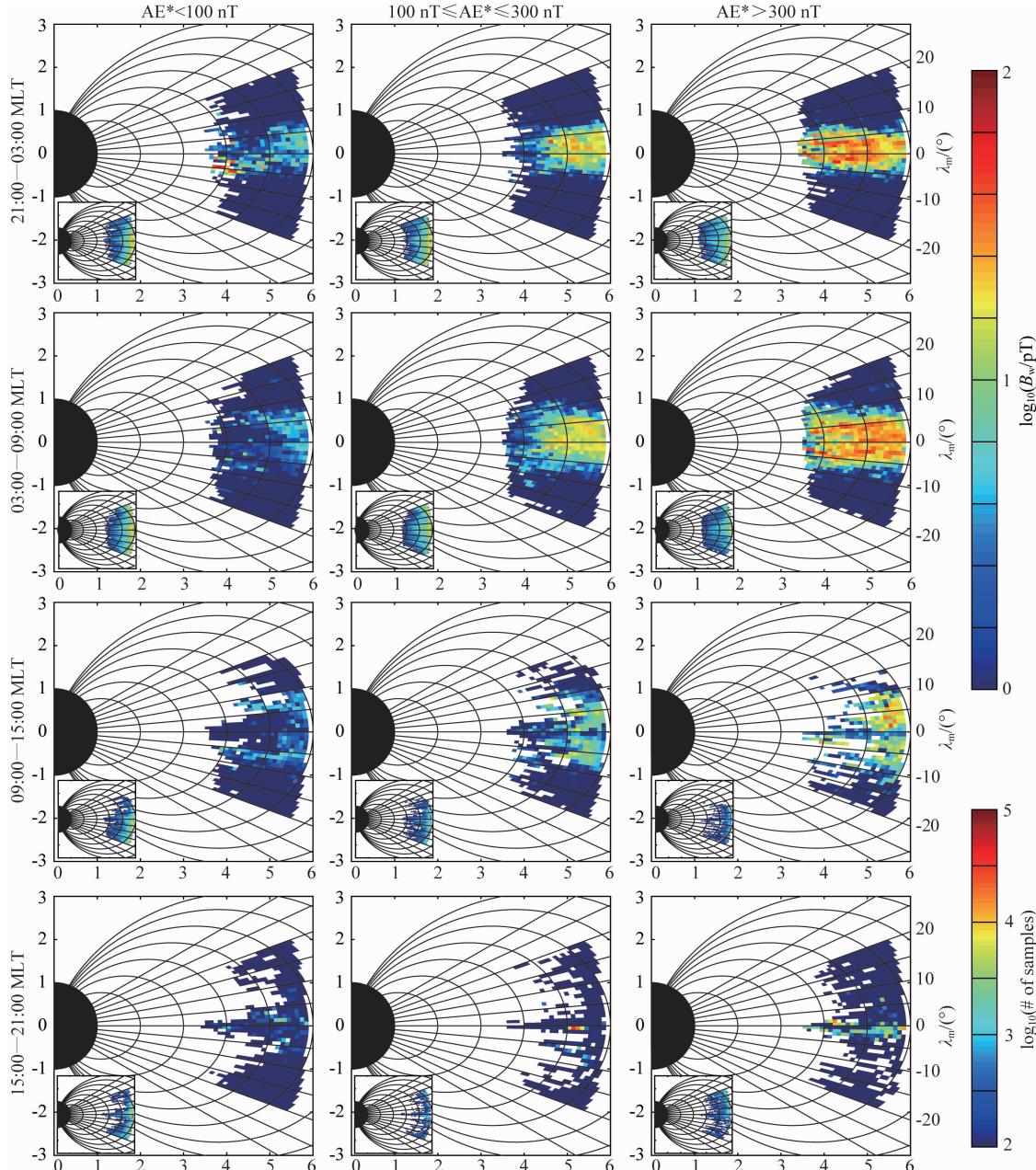


图 3 上频带合声波的平均强度在 $(L, MLAT)$ 上统计分布

Fig. 3 The statistical distribution of intensity for upper-band chorus in $(L, MLAT)$ plain

即 L 值)绘制的。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。将一天分成 4 个时段, 分别为 21—03MLT、03—09MLT、09—15MLT 以及 15—21MLT。对于图中的每种地磁活动条件和磁地方时范围, 小图给出每个网格确定的上频带合声波样本个数, 最低样本个数设为 100。大图给出上频带合声波平均场强幅度的全球分布。右侧上方的色条表征上频带合声波平均场强幅度;下方的色条表征样本点数。首先, 上频带磁层合声波的平均场强幅度与地磁活动条件密切相关, 随着地磁活动的增强, 上频带磁层合声波的平均场强幅度显著增大。其次, 上频带磁层合声波的平均场强幅度随 MLT 的变化也很显著,

比较 4 个时段可以得到, 在 03—09MLT, 上频带合声波的平均场强幅度最强, 分布范围最广; 在 15—21MLT, 上频带合声波的平均场强幅度最弱。另外, 也可以看到上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—03MLT 和 03—09MLT 内, L 约为 4~6, 上频带磁层合声波的平均幅度最强; 在 L 约为 3.5~4, 上频带磁层合声波的平均幅度最弱。最后, 上频带合声波主要分布在 $|\text{MLAT}| < 10^\circ$, 在 $|\text{MLAT}| < 5^\circ$ 平均场强幅度最强。

3.2 上频带合声波发生率的全球分布

图 4 给出了上频带磁层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布结果。由于上频带合声波比下频带合声波要弱,

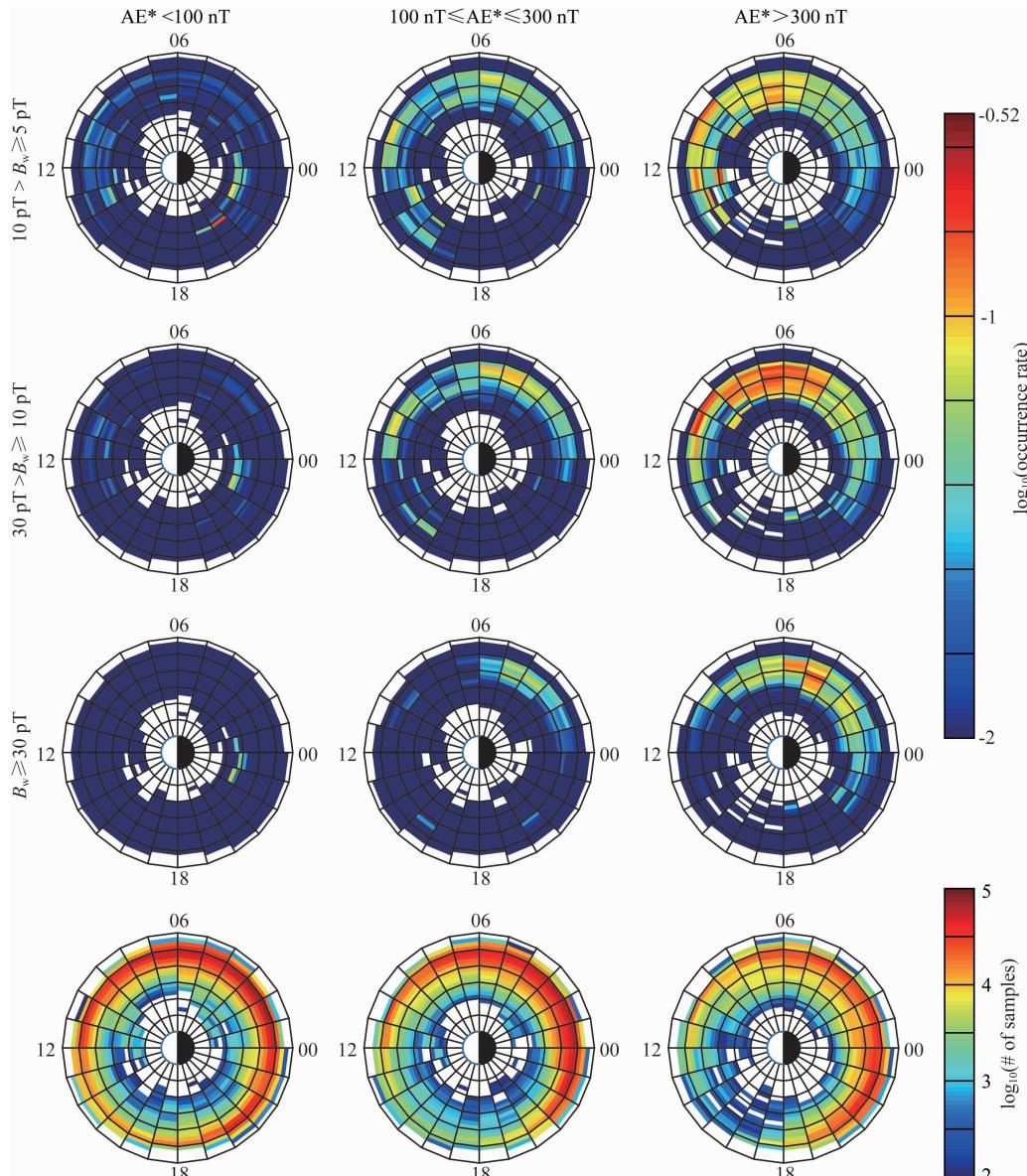


图 4 不同强度的上频带合声波发生率随地磁活动指数变化的分布

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

其按幅度的分类方法有所不同。本文中将上频带磁层合声波的平均场强幅度分为3类,当 $5 \text{ pT} \leq B_w < 10 \text{ pT}$ 为弱幅度; $10 \text{ pT} \leq B_w < 30 \text{ pT}$ 为中等幅度; $B_w \geq 30 \text{ pT}$ 为强幅度。前3行的9张图给出上频带磁层合声波发生率的全球分布,第4行的3张图是按照地磁活动条件给出的每个网格内的上频带磁层合声波总样本数。右侧上方的色条表征发生率;下方的色条表征样本点数。首先,上频带磁层合声波的发生率与地磁活动条件密切相关。在磁静期,弱幅度的上频带合声波会被观测到,其发生率约为3%;在中等磁扰期,弱幅度的上频带合声发生率约呈现出增加的趋势,约为6%;在强磁扰期,弱幅度的上频带合声波发生率增加到约为10%。其他幅度的上频带合声波的发生率与地磁活动关系与之类似,但是弱幅度的上频带合声波发生率最大,强幅度的上频带合声波的发生率最小。另外,上频带磁层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,弱幅度的上频带合声波的发生率在L约为

4.0~6.0最大,中等幅度和强幅度的上频带合声波的发生率在L约为4.5~6.0最大。最后,上频带磁层合声波的发生率分布随磁地方时的变化很显著。在磁静期,弱幅度的上频带合声波在夜侧(22—00MLT)发生率最高,在夜侧至午侧(22—13MLT)均有分布,中等幅度和强幅度的上频带合声波在夜侧的发生率最高;在中等磁扰期,弱幅度的上频带合声波分布在夜侧至下午侧(01—15MLT),中等幅度的上频带合声波分布至夜侧至午侧(01—11MLT),强幅度的上频带合声波分布在夜侧(01—05MLT);在强磁扰期,弱幅度的上频带合声波分布在夜侧至午侧(23—14MLT),在05—11MLT发生率最大,中等幅度的上频带磁层合声波分布在夜侧至午侧(23—12MLT),在04—10MLT发生率最大,强幅度的上频带磁层合声波在夜侧至晨侧(00—09MLT),在04—05MLT发生率最大。

为了进一步分析上频带合声波发生率随磁纬度的变化,图5给出了上频带磁层合声波的发生率随



图5 上频带合声波发生率在不同磁纬度的分布

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

磁纬度的分布。前 3 行的 12 张图给出了上频带磁层合声波发生率的全球分布,第四行的 4 张图是对应四个磁纬度范围内的上频带磁层合声波的样本数。将磁纬度(MLAT)分成 $|MLAT| < 5^\circ$ 、 $5^\circ \leq |MLAT| < 10^\circ$ 、 $10^\circ \leq |MLAT| < 15^\circ$ 、 $15^\circ \leq |MLAT| < 20^\circ$ 四个范围。首先,弱幅度的上频带磁层合声波的发生率最高,强幅度的上频带磁层合声波的发生率最低。其次,上频带磁层合声波的发生率随 MLT 的变化有显著差异。对于弱幅度的上频带合声波,在 $|MLAT| < 5^\circ$, 在夜侧至晨侧(23—09MLT)的发生率最大,约为 7%;在 $5^\circ \leq |MLAT| < 10^\circ$, 在晨侧至午侧(06—15MLT)的发生率最大;在 $10^\circ \leq |MLAT| < 15^\circ$, 仅在 06MLT 和午侧(11—13MLT)有分布。对于中等幅度的上频带合声波,在 $|MLAT| < 5^\circ$, 在夜侧至晨侧(23—09MLT)的发生率最大,约为 8%;在 $5^\circ \leq |MLAT| < 10^\circ$, 在晨侧至午侧(05—11MLT)的发生率最大。对于强幅度的上频带合声波,在 $|MLAT| < 5^\circ$, 夜侧(00—05MLT)的发生率最大,在 $5^\circ \leq |MLAT| < 10^\circ$, 夜侧和日侧的极小范围内有发生率分布。

4 结论

地球磁层哨声模合声波的时空分布特性,已经利用多个卫星计划(包括 CRRES、Polar、CLUSTER、THEMIS)的观测数据进行过详细分析(Li et al., 2009a, 2009b, 2010, 2011; Meredith et al., 2001, 2004; 李柳元等, 2008)。Meredith 等(2012)使用 DE1, CRRES, Cluster 1, Double Star TC1, THEMIS A, D, E 共 5 个卫星计划的观测数据对合声波进行了统计分析,由于这些卫星数据的总覆盖区域大,所得统计结果能够更加精确反映合声波在地球空间的分布情况,特别是较大的 L-shell 区域。统计结果表明,在 $4 < L < 9$ 的区域上带合声波的强度在地磁活动强烈期间可达 10 pT 的量级,发生的时间为 23—11MLT,发生的区域为 $3 < L < 7$ 。然而,由于数据质量、精度以及卫星运行轨道的限制,大部分研究结果集中在较高 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 卫星计划由两颗轨道和科学载荷完全相同的卫星组成,已经在 $L < 5$ 的区域内积累了能覆盖所有 MLT 的观测数据。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,为研究地球磁层空间等离子体波动包括哨声模合声波提供了

最新的一流观测数据。本文不仅提供了上带合声波的强度分布和发生率,还详细研究了上带合声波的纬度分布。由于 Van Allen Probes 卫星在低 L-shell 区域($L < 6$)获取了高精度,高质量的数据,该文的统计结果在低 L-shell 区域相对于 Meredith 等的结果,具有更高的可靠性和精确性。但是受限于 Van Allen Probes 卫星的轨道特性,其数据不能有效覆盖高纬度区域,所以没有高纬度区域的统计结果。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,对内磁层上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,上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。上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。

(2) 上频带合声波在外辐射带中心区域($L = 4\sim 6$)幅度最强,主要发生于夜侧至晨侧(22—09MLT)的磁地方时区间,强磁扰期间平均幅度可达 40 pT 以上,在低纬度区域幅值最高可达 100 pT 以上。

(3) 上频段合声波在午夜侧(21—03MLT)主要出现在 10° 的磁纬范围内,在晨侧(03—09MLT)可以到达 15° 磁纬,在正午/午后侧(09—15MLT)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,在昏侧基本上所有观测纬度上的发生几率都很低。

(4) 中等幅度($10\sim 30$ pT)的上频带合声波在夜侧至晨侧(23—09MLT)靠近磁赤道区域的发生率最高,可达 15% 左右。强幅度(≥ 30 pT)的上频带合声波普遍分布在夜侧(01—05MLT),发生率最小。

本文的研究结果进一步深入了解了对地球内磁层上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,结合我们已经建立的上频带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等离子体波动对地球等离子体片、辐射带、环电流动力学过程的定量贡献。

致谢 感谢国家自然科学基金(41304130, 41574160, 41204120, 41474141)、中国博士后科学基金(2013M542051, 2014T70732)与国家级大学生创新创业项目(201510486081)的支持。地磁活动指数的数据来自 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

- Inan U S, Chiu Y T, Davidson G T. 1992. Whistler-mode chorus and morningside aurorae. *Geophys. Res. Lett.*, 19(7): 653-656, doi: 10.1029/92GL00402.
- Johnstone A D, Walton D M, Liu R, et al. 1993. Pitch angle diffusion of low-energy electrons by whistler mode waves. *J. Geophys. Res.*, 98(A4): 5959-5967, doi: 10.1029/92JA02376.
- 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. 2008. Whistler-mode waves modify the high-energy electron slot region and the outer radiation belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(2): 316-324, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.02.004.
- 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(9): 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(A1): 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(A6): 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(A12): 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. 2012. 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, Horne R B, Thorne R M, et al. 2004. Substorm dependence of plasmaspheric hiss. *J. Geophys. Res.*, 109(A6): A06209.
- Meredith N P, Horne R B, Thorne R M, et al. 2009. Survey of upper band chorus and ECH waves: Implications for the diffuse aurora. *J. Geophys. Res.*, 114(A7): A07218, doi: 10.1029/2009JA014230.
- Meredith N P, Horne R B, Sicard-Piet A, et al. 2012. Global model of lower band and upper band chorus from multiple satellite observations. *J. Geophys. Res.*, 117(A10): A10225, doi: 10.1029/2012JA017978.
- Ni B B, Thorne R M, Shprits Y Y, et al. 2008. Resonant scattering of plasma sheet electrons by whistler-mode chorus: Contribution to diffuse auroral precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, 35(11): L11106, doi: 10.1029/2008GL034032.
- 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(A4): A04219, doi: 10.1029/2010JA016233.
- Thorne R M, Ni B B, Tao X, et al. 2010. Scattering by chorus waves as the dominant cause of diffuse auroral precipitation. *Nature*, 467(7318): 943-946, doi: 10.1038/nature09467.

附中文参考文献

- 李柳元, 曹晋滨, 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, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.02.004.

(本文编辑 汪海英)