

# 基于范阿伦卫星观测数据的等离子体层嘶声全球分布的统计分析\*

项正 谈家强 倪彬彬<sup>†</sup> 顾旭东 曹兴 邹正洋 周晨 付松 石润  
赵正予 贺丰明 郑程耀 殷倩 王豪

(武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430072)

(2016年6月16日收到; 2016年9月20日收到修改稿)

等离子体层嘶声是引起辐射带电子投掷角散射进而沉降到地球大气层的重要物理机理, 也被认为是导致地球内、外辐射带之间槽区形成的主因, 因此研究空间等离子体层嘶声的全球分布特性具有重要科学意义. 本文利用范阿伦探测双星中的A星从2012年9月到2015年5月长达33个月的高质量波动观测数据, 详细计算了等离子体层嘶声的平均波幅和发生率, 建立了等离子体层嘶声的全球分布数据库, 并细致分析了其场强幅度随地磁活动水平、磁壳值 $L$ 、地磁纬度、磁地方时的统计变化规律. 结果表明, 等离子体层嘶声的平均波幅与地磁活动剧烈程度具有很强的相关性, 并表现出明显的昼夜不对称性. 随着地磁活动的增强, 日侧等离子体层嘶声的平均波幅相应增大, 增强的区域集中在 $2.5 < L < 4$ , 但是夜侧等离子体层嘶声的平均波幅反而下降. 另外, 不同幅度的等离子体层嘶声随地磁活动的变化表现出不同的响应特性. 随着地磁活动水平的增强, 较小幅度(5—30 pT)的等离子体层嘶声的日侧发生率减小, 夜侧发生率增大; 更强幅度( $> 30$  pT)的等离子体层嘶声的变化特性正好相反, 日侧发生率增大, 夜侧发生率减小. 在各种地磁活动条件下, 磁赤道面附近及中纬地区等离子体层嘶声都广泛存在, 波动幅度位于5—30 pT范围的嘶声发生概率最大. 以上统计观测结果为现有的等离子体层嘶声全球分布模型提供了合理、可靠的补充, 充分说明不同场强幅度的等离子体层嘶声在 $2 < L < 6$ 的内磁层空间经常性地存在, 为定量分析、模拟不同能量、不同投掷角的地球辐射带电子在不同太阳风与磁层背景条件下的动态时空变化过程提供了重要参数支持.

**关键词:** 范阿伦卫星, 等离子体层嘶声, 波动全球分布, 平均幅值

**PACS:** 94.05.Pt, 94.30.-d, 94.30.Tz, 94.30.cq

**DOI:** 10.7498/aps.66.039401

## 1 引言

等离子体层嘶声是一种无结构宽频的哨声波, 通常在等离子层内和等离子体层羽迹中被观测到<sup>[1-3]</sup>. 在地磁平静时期等离子体层嘶声能长期存在, 幅值在10 pT左右; 在磁暴和亚暴期间, 等离子体层嘶声能显著增强, 幅值最高可达到100 pT以上, 这种增强被认为与亚暴期间等离子体片中的粒子注入引起的波动不稳定性增强有关. 等离子体层嘶声通过回旋共振引起的投掷角扩散能在几天到

几个星期的时间内将几十千电子伏特至几兆电子伏特的辐射带电子沉降到地球大气层<sup>[4-7]</sup>, 因此它在辐射带电子动态演化过程中起到重要作用. 具体而言, 对于几十到几百千电子伏特的电子, 等离子体层嘶声被认为是导致辐射带电子槽区位置的能量依赖性的主因<sup>[6,7]</sup>; 而对于能量高于1 MeV的相对论电子, 等离子体层嘶声是引起相对论电子通量逐渐衰减的重要机理<sup>[8,9]</sup>.

等离子体层嘶声的激发机理尚未彻底研究清楚, 早年的研究认为磁赤道面附近发生的电子回旋

\* 国家自然科学基金(批准号: 41204120, 41304130, 41474141, 41574160)、中国博士后科学基金(批准号: 2013M542041, 2014T70732, 2015M582265)和国家级大学生创新创业项目(批准号: 201510486081)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [bbni@whu.edu.cn](mailto:bbni@whu.edu.cn)

共振不稳定性对于激发等离子体层嘶声具有重要作用. 等离子体层嘶声在磁赤道面被激发然后传播到高纬地区, 随着纬度的增加, 等离子体层嘶声的传播角逐渐变大<sup>[1,10]</sup>. 近年的射线追踪模拟和观测结果表明, 等离子体层嘶声还可以由等离子体层外的哨声合声波传播进入等离子体层而形成<sup>[11,12]</sup>. 这一过程受到哨声合声波自身的特性和空间等离子体密度分布的影响<sup>[13,14]</sup>.

已有研究分别利用早期的 CRRES 卫星和 POLAR 卫星的波动观测数据分析了等离子体层嘶声的全球分布<sup>[2,15]</sup>. 基于 CRRES 卫星数据建立的嘶声模型经常被用来开展辐射带电子动力学过程建模, 但是 CRRES 卫星的波动磁场功率谱密度是在假设等离子体层嘶声波平行传播的条件下从电场功率谱密度的观测数据换算得到的, 具有一定的误差, 尤其是在离开磁赤道附近的区域. 同时由于缺乏各种波模的传播角和椭圆极化率信息, 也存在难以将等离子体层嘶声与磁声波及背景噪声区分开来的困难. CRRES 卫星的运行周期较短, 只有 15 个月, 在日侧有明显的缺失, 而向日面一般认为是等离子体层嘶声波幅最强的区域. 等离子体层嘶声的频率范围一般选取为 100—2000 Hz, 但是最近范阿伦卫星的波动观测发现存在 20 Hz 左右的超低频等离子体层嘶声<sup>[15,16]</sup>, 并且这种超低频的等离子体层嘶声对辐射带电子的作用效果与通常的等离子体层嘶声具有较大差异<sup>[17]</sup>. 值得说明的是, CRRES 卫星观测等离子体波的频率下限是 100 Hz, 因此它不能观测低频率的等离子体层嘶声. POLAR 卫星是一颗极轨卫星, 在磁赤道面附近的停留时间较短, 而等离子体层嘶声主要在赤道面附近发生并向更高纬度传播, 因此 POLAR 卫星并不能很好地观测磁赤道面附近的等离子体层嘶声现象.

随着 2012 年范阿伦卫星的发射, 它处于内磁层的理想运行轨道和发布高质量、长时间波动数据, 为开展内磁层等离子体层嘶声全球分布特性的细致研究提供了一个绝佳机会, 是对现有的等离子体层嘶声全球分布模型的有效补充. 文献<sup>[18,19]</sup>已经用范阿伦卫星的数据统计了等离子体层嘶声幅的全球分布, 但缺乏等离子体层嘶声的纬度分布和发生率等重要信息. 本文利用范阿伦卫星 2012 年 9 月到 2015 年 5 月长达 33 个月的波动观测数据, 对等离子体层嘶声的全球分布进行统计分析. 第

二部分介绍范阿伦卫星的数据及处理方法, 第三部分介绍统计分析结果, 第四部分是对研究结果的总结.

## 2 数据来源与分析方法

范阿伦卫星是美国航空航天局于 2012 年 8 月 30 日在卡拉维尔角空军基地发射的专门针对辐射带探测的卫星<sup>[20]</sup>, 包括 A, B 两颗轨道和携带仪器完全相同的卫星. 两颗卫星经过同一位置的时间相隔几小时不等, 通过两颗卫星的观测可以更好地研究辐射带的时空变化. 范阿伦卫星的近地点高度在 500—675 km 之间, 远地点高度在 30050—31250 km 之间, 轨道倾角 10°, 轨道周期 9 h. 每颗范阿伦卫星上都携带有完全相同的 5 组仪器装置. 本文的工作主要使用 EMFISIS (electric and magnetic field instrument suite and integrated science) 仪器测量的空间波动磁场数据<sup>[21,22]</sup>. EMFISIS 仪器的宽带接收机 (WFR) 能提供 10 Hz—12 kHz 的波动功率谱密度信息, 利用奇异值分解的方法, 可以计算空间等离子体波的传播角和椭圆极化率<sup>[23]</sup>; 高频接收机 (HFR) 能提供 10—400 kHz 的波动电场数据, 可以分析辨别上混杂波频率的大小, 进而计算卫星所在位置的电子密度<sup>[24]</sup>. 文中的地磁指数信息来源于美国国家航天局的 OMNIWEB 数据中心<sup>[25]</sup>.

图 1 给出了范阿伦 A 卫星观测到的 2013 年 3 月 3 日至 3 月 4 日等离子体层嘶声的示例图. 图中从上到下依次为: AE 指数, HFR 测量的高频电场功率谱密度, WFR 测量的电场功率谱密度, WFR 测量的磁场功率谱密度, 通过奇异值分解方法计算的传播角、椭圆极化率、等离子体层嘶声的磁场功率谱密度、等离子体层嘶声的幅值. 世界时以及磁鞘值  $L$ -shell (磁力线在磁赤道时距地心的距离)、磁地方时 (MLT)、磁纬度 (MLAT) 等信息也被标注在图的下方. 从图 1(a) 中可以看到: 第一段等离子体层嘶声出现时地磁活动为中等活跃程度, AE 指数从 200 下降到 100 以下; 第二段等离子体层嘶声出现时地磁活动十分平静, AE 指数一直低于 100. 从图 1(b) 能看到明显的静电回旋波 (ECH wave) 和上混杂波频率. 本文中通过判断 ECH 波是否明显来确定卫星位置是处于等离子体层以外还是以内, 以此区分等离子体层嘶声和哨声合声波. 图 1(d) 中

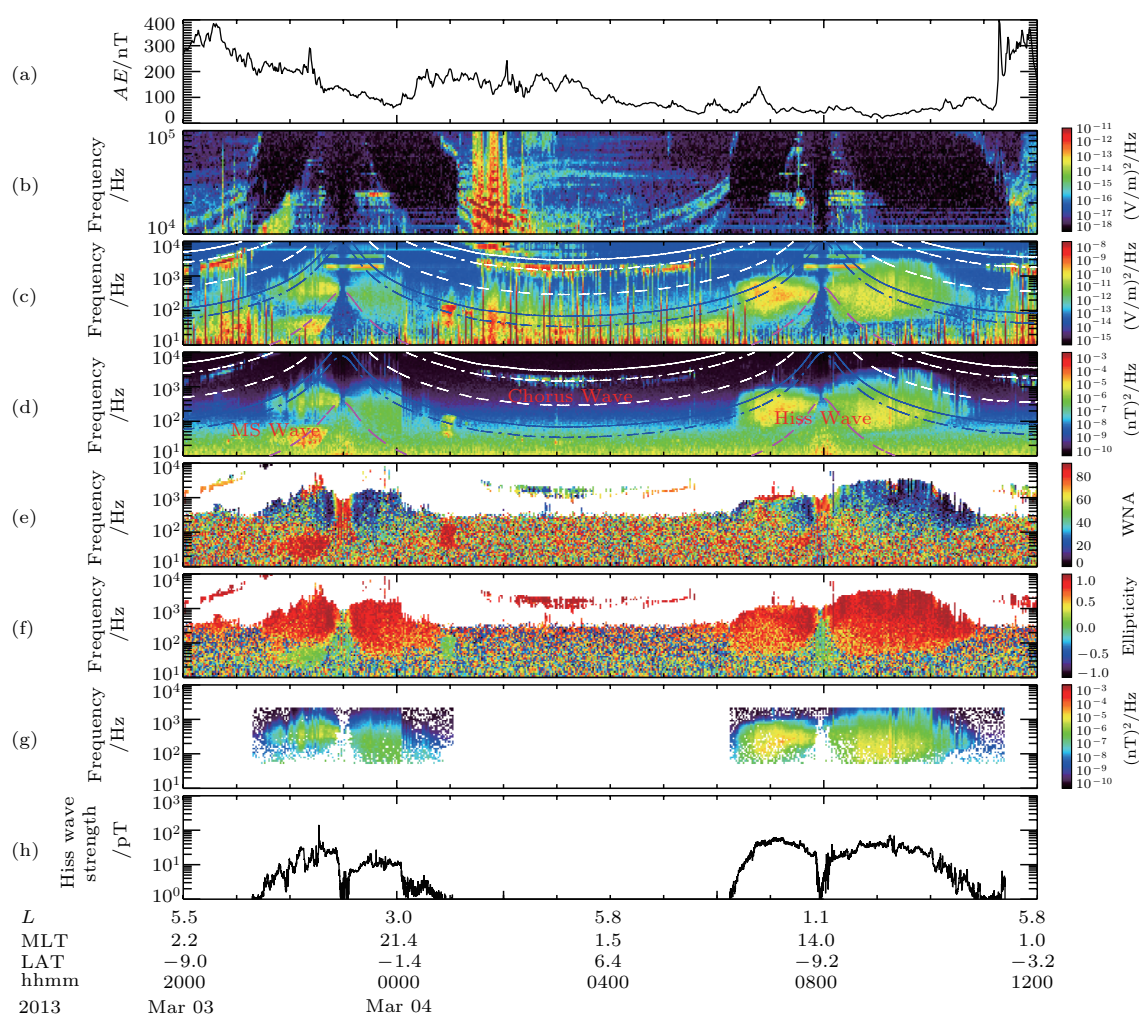


图1 (网刊彩色) 2013.3.3—2013.3.4 期间范阿伦 A 卫星观测到的等离子体层嘶声事件示例

Fig. 1. (color online) The example of hiss wave event measured by Van Allen Probe A during March 3–4, 2013. The panels from top to bottom are AE index, electric field power spectral densities at the frequency spans of EMFISIS HFR and WFR, magnetic field power spectral densities observed by WFR, wave normal angle, ellipticity, magnetic field power spectral densities for identified hiss waves, and corresponding hiss wave amplitudes.

标注出了等离子体层嘶声、哨声合声波、磁声波的位置, 图中各曲线分别代表电子回旋频率、0.5 倍电子回旋频率、0.1 倍电子回旋频率、下混杂波频率、0.5 倍下混杂波频率、质子回旋频率. 图 1(g) 是根据图 1(e) 和图 1(f) 中的传播角和椭圆极化率等判定出的等离子体层嘶声. 判断标准为波模在等离子体层以内, 频率在 20 Hz—2 kHz 之间, 传播角小于  $30^\circ$ , 椭圆极化率大于 0.7. 通过与图 1(d) 对比可以看出该标准能很好地将等离子体层嘶声与哨声合声波和磁声波区分开来. 图 1(h) 是将图 1(g) 中的磁场功率谱密度梯形积分得到的等离子体层嘶声的波幅, 两段等离子体层嘶声的波幅大部分时间都

在 10 nT 之上, 第二段等离子体层嘶声的最高幅值能达到 100 nT, 说明在地磁平静时间段, 仍存在很强的等离子体层嘶声. 本文利用上述判断方法统计了从 2012 年 9 月至 2015 年 5 月范阿伦 A 卫星观测到的所有等离子体层嘶声, 建立了等离子体层嘶声的时间数据库, 继而开展了后续研究.

### 3 统计分析结果

使用第二部分得到的等离子体层嘶声幅值的范阿伦 A 卫星数据库, 本文将分地磁活动剧烈程度、MLAT、MLT 对等离子体层嘶声平均波幅和发生率的全局分布特性进行了统计分析.



### 3.1 等离子体层嘶声幅值的全球分布

图2是范阿伦A卫星观测的等离子体层嘶声幅值随地磁活动剧烈程度的 $L$ -shell和MLT分布图. 图中按 $AE^*$ 值的不同将地磁活动剧烈程度分成平静( $AE^* < 100$  nT)、中等( $100 \text{ nT} \leq AE^* \leq 300$  nT)、剧烈( $AE^* > 300$  nT)三种情况, $AE^*$ 值指的是等离子体层嘶声发生时之前3 h  $AE$ 指数的最大值. 2004年, Meredith等<sup>[2]</sup>曾指出注入的电子从夜侧漂移到日侧为等离子体层嘶声的激发提供能量需要经过一段时间, 因此亚暴的发生与等离子体层嘶声波幅的增长存在延迟效应. 使用 $AE^*$ 指数比 $AE$ 指数能更好地反映等离子体层嘶声与地磁活动程度的相关性. Li等<sup>[18]</sup>选择 $AL^*$ 来表征地磁活动剧烈程度, 因为他们认为 $AL$ 指数与亚暴活动的联系更直接,  $AL^*$ 是等离子体层嘶声发生之前3 h  $AL$ 指数的最小值.  $AU$ 和 $AL$ 指数分别是极光带的全部地磁台站的磁场的水平分量 $H$ 与宁静平均水平分量的最大正偏差和最大负偏差, 每分钟计算一次.  $AE$ 指数是 $AU$ 与 $AL$ 之差, 即每分钟最大正变化与最大负变化绝对值之和. 不论出现扰动的地点如何不同,  $AE$ 指数整体上代表极光带的磁扰程度, 即极区磁亚暴强度的量度. 所以本文选择 $AE^*$ 作为表征地磁活动剧烈程度的参数. 大圆代表等离子体层嘶声波幅随 $L$ -shell和MLT的

全球分布,  $L$ -shell 的范围为 $2 < L < 6$ , 分辨率为0.5个 $L$ -shell, MLT的范围为00:00—24:00, 分辨率是1 h, 12:00代表日侧, 00:00代表夜侧. 大圆右下角的小圆代表大圆中相应位置的采样点数, 为使结果具有代表性, 避免个别点的值影响过大, 我们剔除了采样点小于100的结果. 大圆中的颜色代表等离子体层嘶声幅值的大小, 对应于长的颜色条, 单位为pT. 小圆中的颜色代表取样点个数的多少, 对应于短的颜色条, 能看到两年半的范阿伦A卫星数据对整个辐射带各个MLT提供了很好的覆盖程度, 十分适合用于全球分布的统计分析. 从图2(a)—(c)可以看出, 随着地磁活动剧烈程度的增加, 日侧(06:00—15:00 MLT)的等离子体层嘶声波幅随之增加, 而夜侧(19:00—04:00 MLT)的等离子体层嘶声却随之下降. 这种现象的原因可能是地磁活动剧烈时期, 夜侧的热电子通量较高, 对哨声波有很强的朗道衰减作用, 从而限制了哨声合声波传播进入等离子体层进而演化成等离子体层嘶声, 导致地磁活动剧烈时期夜侧的等离子体层嘶声波幅反而下降. 日侧等离子体层嘶声波幅从平静时期的20 pT增长到中等地磁活动剧烈程度时的40—50 pT, 在地磁活动剧烈期间增长到最高值几百pT. 这些现象充分说明了等离子体层嘶声的波幅与地磁活动剧烈程度有很强的相关性, 并表现出明显的昼夜不对称性.

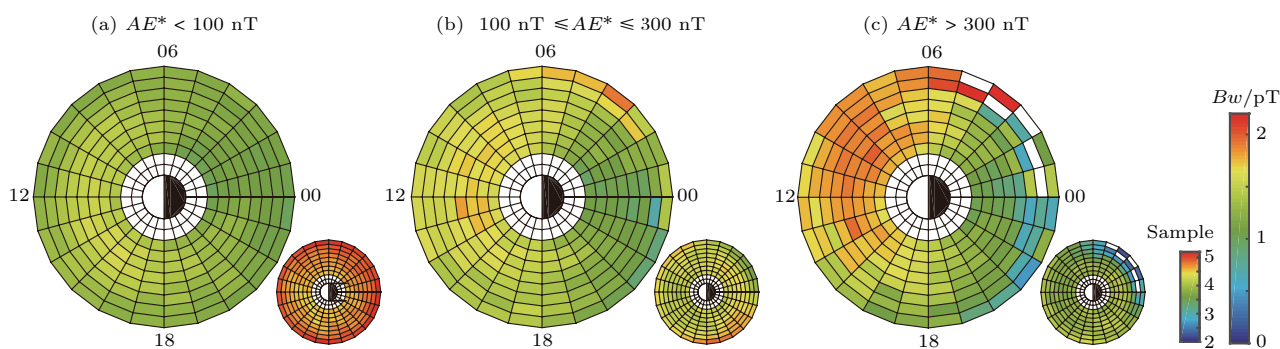


图2 (网刊彩色) 不同地磁活动条件下等离子体层嘶声的平均场强幅度和样本数随 $L$ -shell和MLT的全球分布  
Fig. 2. (color online) Global distribution of averaged wave amplitude (larger panels) and sample number (smaller panels) of hiss waves as functions of  $L$ -shell and magnetic local time (MLT) corresponding to three levels of geomagnetic activity (from left to right: weak,  $AE^* < 100$  nT; moderate,  $100 \text{ nT} \leq AE^* \leq 300$  nT; active,  $AE^* > 300$  nT).

图3给出的是等离子体层嘶声随MLT、MLAT和地磁活动剧烈程度的统计分析结果. 每一幅图中包含两幅扇形图形, 其中大的扇形是将卫星位置投影到一个子午面上得到, 图中曲线代表 $L$ -shell相

同的磁力线, 图中从 $L = 2$ 开始每隔一个 $L$ -shell画一根磁力线, 直线代表MLAT相同的点, 每隔 $5^\circ$ 画一条, MLAT最高的一根直线为 $20^\circ$ , 图中颜色代表等离子体层嘶声的平均幅值. 小扇形是采样点数的

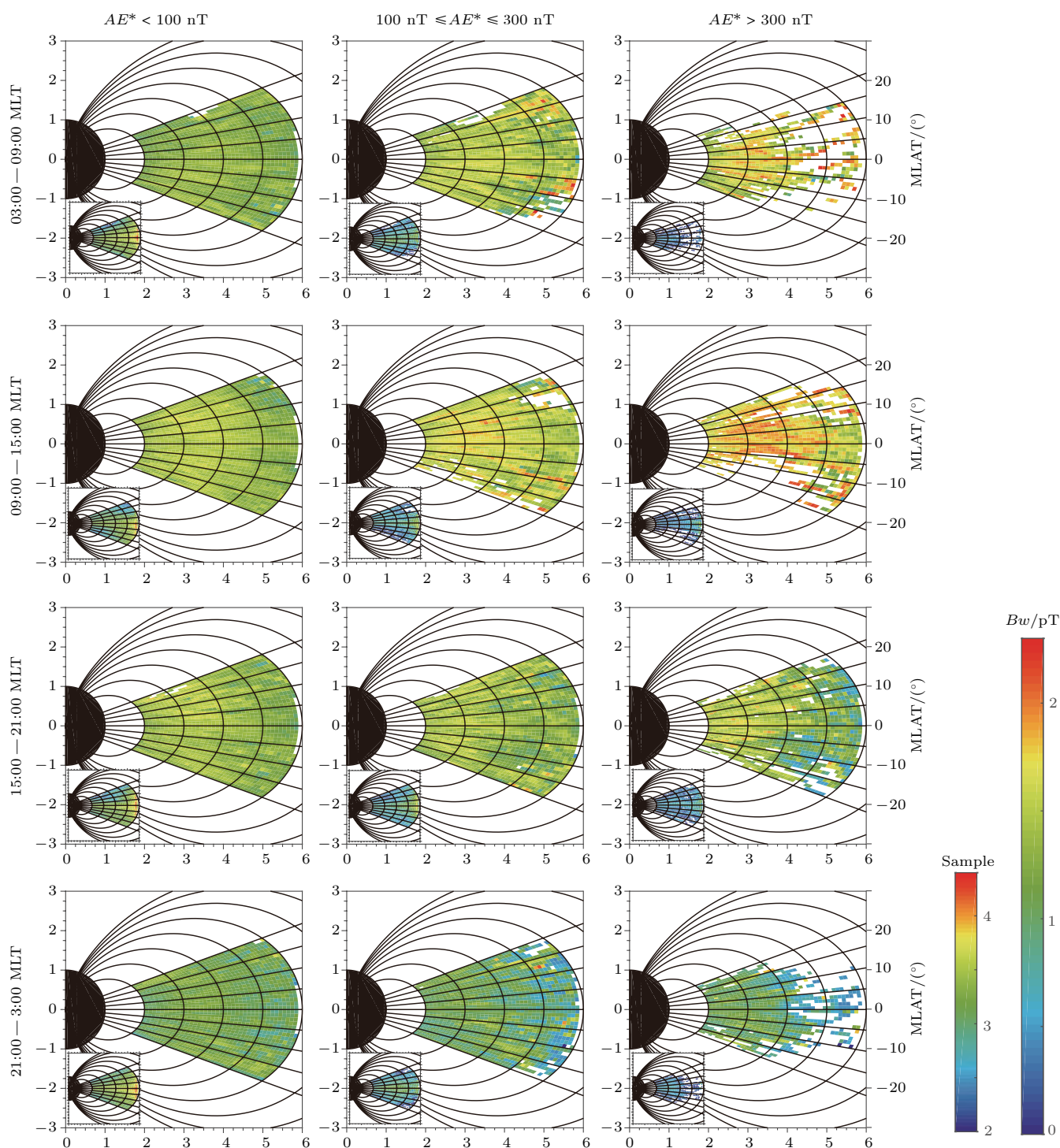


图3 (网刊彩色) 不同地磁活动条件下等离子体层嘶声在不同 MLT 区间的平均场强幅度随磁壳值  $L$  和 MLAT 的二维统计分布  
 Fig. 3. (color online) Two-dimensional statistical distribution of average hiss wave amplitude as functions of  $L$ -shell and geomagnetic latitude, corresponding to various geomagnetic activity levels (from left to right) and various MLT intervals (from top to bottom).

统计结果, 同样投影到同一个子午面上得到. 大小扇形中颜色的含义由图右边的两根颜色条表示. 地磁活动剧烈程度的分类和之前一样, 分成平静 ( $AE^* < 100$  nT)、中等 ( $100 \text{ nT} \leq AE^* \leq 300$  nT)、剧烈 ( $AE^* > 300$  nT) 三种情况. MLT 分成四段,

即 03:00—09:00, 09:00—15:00, 15:00—21:00 和 21:00—03:00. 从图 3 中可见等离子体层嘶声在各个 MLAT 的波幅差异不大. 对于 03:00—09:00 MLT 范围内的等离子体层嘶声, 随着地磁活动剧烈程度的增加, 等离子体层嘶声波幅随之增加, 尤

其是在  $5 < L < 6$ ,  $5^\circ < \text{MLAT} < 20^\circ$  的位置.  $AE^* > 300$  nT 情况下的 03:00—09:00 MLT 范围内的等离子体层嘶声在  $L > 4$  之后数据较少, 通过查看采样点的图可以发现是因为卫星本身经过这一区域较少导致. 对于 09:00—15:00 MLT 范围内的等离子体层嘶声, 波幅平均值同样与地磁活动剧烈程度正相关,  $AE^* > 300$  nT 情况下的 09:00—15:00 MLT 范围内的等离子体层嘶声平均幅值是所有情况下平均幅值最高的, 说明强地磁活动情况下日侧等离子体层嘶声幅值增长最明显. 15:00—21:00 MLT 范围内的等离子体层嘶声平均幅值的变化规律与前两个 MLT 范围内的等离子体层嘶声平均幅值变化规律相反, 随着  $AE^*$  的增长, 等离子体层嘶声平均幅值反而下降, 表现出地磁活动剧烈程度的负相关性. 对于 21:00—03:00

MLT 范围内的等离子体层嘶声的波幅平均值与 15:00—21:00 MLT 的情况类似, 随着地磁活动剧烈程度的增加, 等离子体层嘶声的幅值并没有增加, 反而出现了下降, 且下降程度更加明显. 这与图 2 中夜侧的观测结果相符, 说明夜侧等离子体层嘶声在地磁活动剧烈时期受到抑制.

### 3.2 等离子体层嘶声发生率的全球分布

本文将等离子体层嘶声发生率定义为给定条件内的数据点数与总的的数据点之比, 采用百分比的形式给出, 该参量能正确反映出对应条件下等离子体层嘶声在空间各位置的发生概率.

图 4 是不同强度的等离子体层嘶声的发生率随地磁活动变化的  $L$ -shell 和 MLT 分布图. 与图 2 类似按  $AE^*$  值的不同将地磁活动剧烈程度分

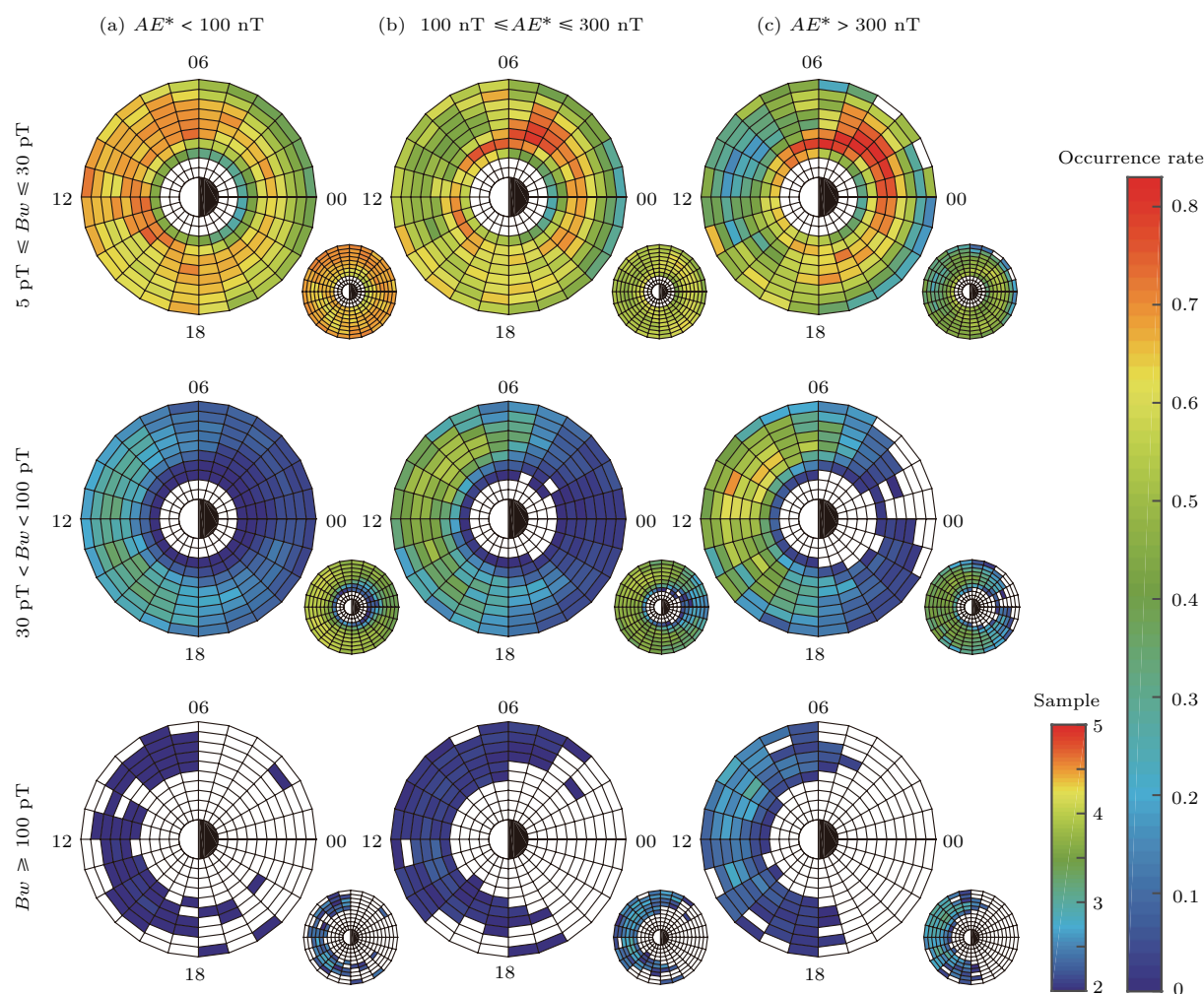


图 4 (网刊彩色) 不同地磁活动条件下不同强度水平的等离子体层嘶声发生率的二维统计分布

Fig. 4. (color online) Two-dimensional statistical distribution of the occurrence rate of plasmaspheric hiss as a function of  $L$ -shell and MLT, corresponding to various geomagnetic activity levels (from left to right) and various levels of average hiss wave amplitude (from top to bottom).



成平静 ( $AE^* < 100$  nT)、中等 ( $100 \text{ nT} \leq AE^* \leq 300$  nT)、剧烈 ( $AE^* > 300$  nT) 三种情况. 本文只对强度  $Bw > 5$  pT 的等离子体层嘶声的发生率进行统计. 将等离子体层嘶声波幅强度分为三类: 中等波幅 ( $5 \text{ pT} < Bw < 30$  pT)、强波幅 ( $30 \text{ pT} \leq Bw \leq 100$  pT)、极强波幅 ( $Bw > 100$  pT) 三种情况. 图中三行对应三类波幅强度, 大圆是发生率随  $L$ -shell 和 MLT 的分布图, 每个大圆右下角对应小圆为采样点个数. 两者分别对应于图右侧的长短颜色条. 从图4可以看出, 对于中等波幅的等离子体层嘶声, 在亚暴活动平静时期各 MLT 都有分布, 向日侧发生率略高于背日侧; 随着亚暴活动的增强, 日侧中等波幅等离子体层嘶声发生率明显下降, 从平静时期的 70% 下降到只有 20%, 但是夜侧中等波幅等离子体层嘶声发生率却从平静时期的 60% 上升到了 80%. 对于强波幅强度的等离

子体层嘶声, 同样日侧的发生率要高于夜侧的发生率, 随着亚暴活动增强, 日侧强波幅强度的等离子体层嘶声的发生概率上升明显, 从平静时的 20% 上升到了 60%. 对于极强波幅的等离子体层嘶声, 可以从采样图中看到主要集中在日侧, 夜侧很少观测到这种极强波幅的等离子体层嘶声, 且主要发生在  $L > 4$  的区域. 与强波幅的等离子体层嘶声相似, 极强波幅的等离子体层嘶声的发生率也随着地磁活动剧烈程度的增加而增加, 并且在地磁活动平静时期仍然能观测到等离子体层嘶声波幅高于 100 pT 的情况, 与我们在图1中的观测相符. 图4所示的这些现象十分清晰地证明了我们在图2中得到的结论, 即等离子体层嘶声的发生率与地磁活动剧烈程度有明显的相关性, 并且呈现明显的昼夜不对称性, 日侧等离子体层嘶声比夜侧等离子体层嘶声的波幅更强, 发生率更高.

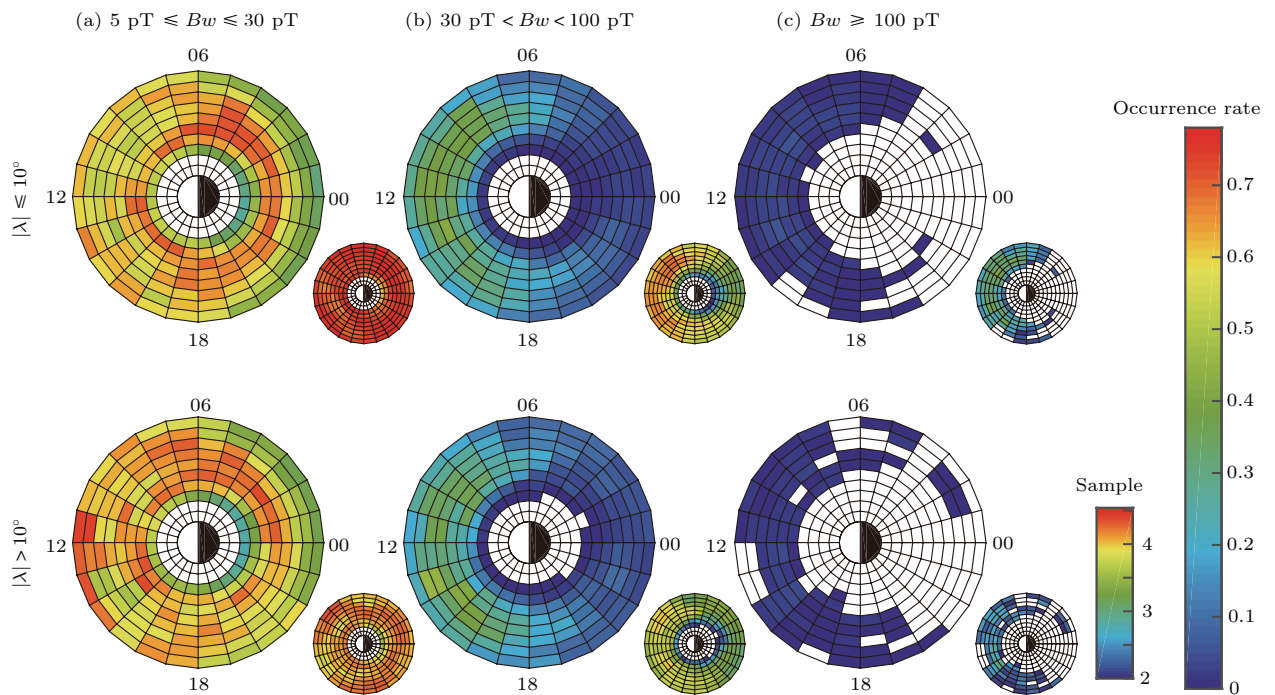


图5 (网刊彩色) 不同强度水平的等离子体层嘶声发生率在不同磁纬区间的二维统计分布

Fig. 5. (color online) Two-dimensional statistical distribution of the occurrence rate of plasmaspheric hiss as a function of  $L$ -shell and MLT, corresponding to various levels of average hiss wave amplitude (from left to right) and geomagnetic latitude intervals (from top to bottom).

图5给出的是不同MLAT上等离子体层嘶声的全球分布统计分析结果. 图5(a)—(c)分别是三种不同波幅强度的等离子体层嘶声, 大圆代表发生率, 小圆代表采样点数, 两者分别对应于图右侧的长短颜色条. 以MLAT等于 $10^\circ$ 为界限将范阿

伦A卫星观测的等离子体层嘶声数据库分为靠近赤道和中纬度区域. 从图5中可知图2、图3中的日侧夜侧不对称性在图5中依然有所体现. 当等离子体层嘶声波幅中等时 ( $5 \text{ pT} < Bw < 30$  pT), 日侧 ( $11 < \text{MLT} < 13$ ,  $5 < L < 6$ ) 远离赤道区域

的等离子体层嘶声发生率( $\approx 80\%$ )明显高于靠近赤道区域的等离子体层嘶声发生率( $\approx 60\%$ ), 其他位置则较为接近. 随着等离子体层嘶声波幅的增加, 两种MLAT情况的等离子体层嘶声发生率都下降, 强波幅时( $30 \text{ pT} \leq Bw \leq 100 \text{ pT}$ )各位置的统计结果较接近, 极强波幅时( $Bw > 100 \text{ pT}$ )在 $2.5 > L < 3$ ,  $11 < \text{MLT} < 16$ 区域近赤道处的等离子体层嘶声发生率略高于远离赤道的位置. 靠近赤道区域的等离子体层嘶声并没有比远离赤道区域的等离子体层嘶声表现出更高的幅度和发生率, 不像磁声波大部分只出现在MLAT低于 $5^\circ$ 的赤道面附近区域.

## 4 结 论

2012年8月发射的范阿伦探测双星具有数据种类齐全、精度高、质量好、轨道参数理想、数据公开等优点, 数据累计至今已经实现了对地球辐射带各个 $L$ -shell、各个MLT的广泛覆盖, 为系统、全面研究地球等离子体层嘶声的全球分布规律提供了坚实的数据基础. 本文利用2012年9月至2015年5月范阿伦A卫星EMFISIS仪器33个月的高精度波动观测数据, 对等离子体层嘶声平均场强幅度和发生率的全球分布特性进行了详细的统计分析. 主要结论如下:

1) 等离子体层嘶声的平均波幅与地磁活动剧烈程度具有很强的相关性, 并表现出明显的昼夜不对称性, 随着地磁活动的增强, 日侧(06:00—15:00 MLT)等离子体层嘶声的平均波幅相应增大, 增强的区域集中在 $2.5 < L < 4$ , 而夜侧(19:00—04:00 MLT)等离子体层嘶声的平均波幅反而下降;

2) 不同幅度的等离子体层嘶声随地磁活动的变化表现出不同的响应特性, 随着地磁活动水平的增强, 较小幅度(5—30 pT)的等离子体层嘶声的日侧发生率减小, 夜侧发生率增大; 更强幅度( $> 30 \text{ pT}$ )的等离子体层嘶声的变化特性正好相反, 日侧发生率增大, 夜侧发生率减小; 强幅度( $> 100 \text{ pT}$ )的等离子体层嘶声主要发生在地磁活动剧烈时期, 日侧发生率能达到20%, 但在平静时期也偶尔发生;

3) 在各种地磁活动条件下, 磁赤道面附近及中纬地区等离子体层嘶声都广泛存在, 波动幅度位于

5—30 pT范围的嘶声发生概率最大.

本文的统计观测结果为现有的等离子体层嘶声全球分布模型提供了合理、可靠的补充, 充分说明不同场强幅度的等离子体层嘶声在 $2 < L < 6$ 的内磁层空间经常性地存在, 一方面有利于深入研究空间等离子体层嘶声的激发机理与传播效应, 另一方面为定量分析、模拟不同能量、不同投掷角的地球辐射带电子在不同太阳风与磁层背景条件下的动态时空变化过程提供了重要参数支持.

感谢美国国家航空航天局的OMNIWEB网上数据库提供的地磁活动指数数据和University of Iowa 研究团队提供的范阿伦卫星的EMFISIS波动数据.

## 参考文献

- [1] Thorne R M, Smith E J, Burton R K, Holzer R E 1973 *J. Geophys. Res.* **78** 1581
- [2] Meredith N P, Horne R B, Thorne R M, Summers D, Anderson R R 2004 *J. Geophys. Res.* **A 109** 06209
- [3] Summers D, Ni B, Meredith N P, Horne R B, Thorne R M, Moldwin M B, Anderson R R 2008 *J. Geophys. Res.* **A 113** 04219
- [4] Lyons L R, Thorne R M 1973 *J. Geophys. Res.* **78** 2142
- [5] Summers D, Ni B, Meredith N P 2007 *J. Geophys. Res.* **A 112** 04207
- [6] Reeves G D, Friedel H W, Larsen B A, Skoug R M, Funsten H O, Claudepierre S G, Fennell J F, Turenner D L, Denton M H, Spence H E, Blake J B, Baker D N 2016 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **121** 397
- [7] Ripoll J F, Reeves G D, Loridan V, Denton M, Santolik O, Kurth W S, Kletzing C A, Turner D L, Henderson M G, Ukhorskiy A Y 2016 *Geophys. Res. Lett.* **43** 5616
- [8] Thorne R M, Li W, Ni B, Ma Q, Bortnik J, Baker D N, Spence H E, Reeves G D, Henderson M G, Kletzing C A, Kurth W S, Hospodarsky G B, Turenner D, Angelopoulos V 2013 *Geophys. Res. Lett.* **40** 3507
- [9] Ni B, Bortnik J, Thorne R M, Ma Q, Chen L 2013 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 7740
- [10] Thorne R M, Church S R, Gorney D J 1979 *J. Geophys. Res.* **84** 5241
- [11] Bortnik J, Thorne R M, Meredith N P 2008 *Nature* **452** 62
- [12] Bortnik J, Li W, Thorne R M, Angelopoulos V, Cully C, Bonnell J, Contel O L, Roux A 2009 *Science* **324** 775
- [13] Chen L, Bortnik J, Li W, Thorne R M, Horne R B 2012 *J. Geophys. Res.* **A 117** 05201
- [14] Chen L, Bortnik J, Li W, Thorne R M, Horne R B 2012 *J. Geophys. Res.* **A 117** 05202
- [15] Tsurutani B T, Falkowski B J, Pickett J S, Santolik O, Lakhina G S 2015 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **120** 414



- [16] Li W, Thorne R M, Bortnik J, Reeves G D, Kletzing C A, Kurth W S, Hospodarsky G B, Spence H E, Blake J B, Fennell J F, Claudepierre S G, Wygant J R, Thaller S A 2013 *Geophys. Res. Lett.* **40** 3798
- [17] Ni B, Li W, Thorne R M, Jacob B, Ma Q, Chen L, Kletzing C A, Kurth W S, Hospodarsky G B, Reeves G D, Spence H E, Blake J B, Fennell J F, Claudepierre S G 2014 *Geophys. Res. Lett.* **41** 1854
- [18] Li W, Thorne R M, Bortnik J, Kletzing C A, Kurth W S, Hospodarsky G B, Nishimura Y 2015 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **120** 3394
- [19] Spasojevic M, Shprits Y Y, Orlova K 2015 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **120** 10370
- [20] Mauk B H, Fox N J, Kanekal S G, Kessel R L, Sibeck D G, Ukhorskiy A 2013 *Space Sci. Rev.* **179** 3
- [21] Kletzing C A 2013 *Space Sci. Rev.* **179** 127
- [22] Van Allen Probes EMFISIS data, the RBSP-EMFISIS Team, <http://emfisis.physics.uiowa.edu/Flight/> [2012-09-01]
- [23] Santolík O, Parrot M, Lefeuvre F 2003 *Radio Sci.* **38** 1010
- [24] Kurth W S, de Pascuale S, Faden J B, Kletzing C A, Hospodarsky G B, Thaller S, Wygant J R 2015 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **120** 904
- [25] NASA OMNIWeb Plus Data, Natalia Papitashvili, <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/> [2012-09-01]

# A statistical analysis of the global distribution of plasmaspheric hiss based on Van Allen Probes wave observations\*

Xiang Zheng Tan Jia-Qiang Ni Bin-Bin<sup>†</sup> Gu Xu-Dong Cao Xing Zou Zheng-Yang  
Zhou Chen Fu Song Shi Run Zhao Zheng-Yu He Feng-Ming Zheng Cheng-Yao  
Yin Qian Wang Hao

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

( Received 16 June 2016; revised manuscript received 20 September 2016 )

## Abstract

Plasmaspheric hiss plays an important role in driving the precipitation loss of radiation belt electrons via pitch angle scattering, which is also known as the major cause of the formation of the “slot” region between the inner and outer radiation belt. Therefore, it is of scientific importance to acquire a complete picture of the global distribution of plasmaspheric hiss. Using the thirty-three month high-quality wave data of the Van Allen Probes from September 2012 to May 2015, which provide excellent coverage in the entire inner magnetosphere, we investigate in detail the characteristics of the global distribution of plasmaspheric hiss bin-averaged wave amplitude and occurrence rate with respect to the geomagnetic activity level,  $L$ -shell, geomagnetic latitude, and magnetic local time. It is demonstrated that the bin-averaged hiss amplitude strongly depends on the level of geomagnetic activity and exhibits a pronounced day-night asymmetry. Dayside hiss shows a tendency intensifying with the disturbed geomagnetic condition, which is primarily confined to  $L = 2.5\text{--}4.0$ . In contrast, the average hiss amplitude on the nightside tends to decrease. It should also be noted that plasmaspheric hiss at different amplitude levels varies distinctly with geomagnetic condition. As the geomagnetic disturbance increases, the occurrence rate of hiss wave at a smaller amplitude level (i.e., 5–30 pT) increases on the nightside but decreases on the dayside, while the occurrence pattern of higher amplitude ( $> 30$  pT) hiss wave is opposite. For high amplitude hiss wave, the occurrence rate increases on the dayside during intense geomagnetic activities while decreases on the nightside. This is probably because during active times, suprathermal electron fluxes are larger on the nightside, which causes stronger Landau damping of whistler mode waves and thus limits the ability of chorus waves to propagate into the plasmasphere and evolve into plasmaspheric hiss. In addition, plasmaspheric hiss waves with the amplitudes ranging from 5 to 30 pT have the highest occurrence probability both around the geomagnetic equator and at higher latitudes. Our statistical results can provide a reasonable and accurate cognition complementary to the current knowledge of the global features of plasmaspheric hiss, especially in the inner magnetosphere of  $L = 2\text{--}6$ , thereby offering essential input parameters of hiss wave distribution for future simulations of the dynamic spatiotemporal variations of radiation belt electrons at different energies and pitch angles under the influence of diverse solar wind and magnetospheric circumstances. Therefore, we suggest that these new properties of hiss wave should be incorporated into the future modeling of radiation belt electron dynamics.

**Keywords:** Van Allen Probes, plasmaspheric hiss, global distribution, averaged wave amplitude

**PACS:** 94.05.Pt, 94.30.-d, 94.30.Tz, 94.30.cq

**DOI:** 10.7498/aps.66.039401

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41204120, 41304130, 41474141, 41574160), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2013M542041, 2014T70732, 2015M582265), and the National Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship, China (Grant No. 201510486081).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [bbni@whu.edu.cn](mailto:bbni@whu.edu.cn)