0254-6124/2024/44(6)-1006-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

TANG Lei, ZHANG Qiaofeng, LU Quanming, GAO Xinliang, KE Yangguang. Experimental Study on the Properties of Helicon Mode Whistler Waves (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 1006–1011. CSTR:32142.14.cjss.2024–yg30. DOI:10.11728/cjss2024.06.2024–yg30

≫空间环境中的等离子体物理过程

等离子体哨声波性质的实验研究*

唐 磊 张乔枫 陆全明
高新亮 柯阳光

(中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026)

摘 要 哨声波是地球内磁层中常见的一种等离子体波动, 其不仅可以加速电子到相对论能量, 还可散射电子沉降到大气层形成弥散极光. 哨声波是一支右旋偏振波, 在空间等离子体中其等相位面通常被认为是一个平面. 近年来, 地面等离子体实验正在成为研究哨声波激发和传播的一种重要手段. 本文在中国科学技术大学线性磁化等离子体装置 (KLMP) 上开展了磁环天线激发波动的实验, 并利用 3D 磁探针测量了波动磁场的演化信息. 测量结果发现, 磁环天线激发了一种等相位面为螺旋状的右旋偏振波动, 根据天线设置的不同, 螺旋波模数分别为 m=0 和 m=1. 通过计算波动的波长和频率, 确定这种螺旋波满足哨声波的色散关系, 为进一步在等离子体实验装置中研究哨声波打下了基础.

关键词 地面等离子体实验, 哨声波, 螺旋波, 磁场测量

中图分类号 P354

Experimental Study on the Properties of Helicon Mode Whistler Waves

TANG Lei ZHANG Qiaofeng LU Quanming
GAO Xinliang KE Yangguang

(*School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026)

Abstract Whistler waves, as common plasma waves, play an important role in the Earth's inner magnetosphere. Through the interaction of whistler waves and particles, some electrons can be accelerated to relativistic energy, and another part of the electrons are scattered into the loss cone and settled into the atmosphere to form diffuse auroras. The whistler wave is a right-handed polarized wave whose equiphase plane is usually considered to be a plane in space plasma. In recent years, ground plasma experiments are becoming an important means to study the excitation and propagation of whistler waves. In the Keda Linear Magnetized Plasma device (KLMP) at the University of Science and Technology of China,

* 国家重点研发计划项目资助 (2022YFA1604600)

2024-10-27 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/)

a magnetic loop antenna is used to excite plasma waves and a 3D magnetic probe is used to measure the evolution of wave magnetic field. The measurement results show that the antenna has excited a right-handed polarization wave with a helical equiphase plane. The helicon waves modules are m=0 and m=1 according to different antenna settings. By calculating the wavelength and frequency of the waves, it is confirmed that the helicon waves can satisfy the dispersion relation of whistler waves, laying the foundation for further research on whistler waves in plasma experimental devices.

Key words　Ground plasma experiments, Whistler waves, Helicon waves, Magnetic field measurement

0　引言

哨声波的发现可以追溯到 100 年前, 最早和最常见的哨声波观测是用长线天线、放大器和声音转换进行的[1]. 在内磁层[2]、近地等离子体片[3,4]、地球磁层顶[5,6]、弓激波[7] 以及太阳风[8] 中都观测到了哨声波. 哨声波在磁层高密度的等离子体层区域通常呈现为非相干的嘶声波, 在等离子体层外的辐射带中则呈现为相干的合声波[2,9,10]. 哨声波被认为在地球辐射带电子的动力学演化过程中起着至关重要的作用[11–13]. 嘶声波和高能电子的共振相互作用引起的投掷角散射驱动了内外辐射带之间槽区的形成[14,15]. 合声波不仅可以加速辐射带中的电子使其达到相对论能量, 还可通过投掷角散射导致大量能量电子进入损失锥中, 产生弥散极光[16–18].

研究空间等离子体中哨声波的方法主要是卫星观测, 并已由此获得了丰富信息. 通常认为空间等离子体中哨声波的等相位面是一个平面, 所以是一种平面波[19]. 由于卫星是单点测量, 无法对等离子体波动的相关物理参量从时间和空间两个维度进行全面的测量, 因此对哨声波仍缺乏全面的了解[20]. 在地面等离子体装置中则很容易实现对等离子体波动时间和空间演化的精确测量, 并可以主动控制波动的频率等参数, 所以地面等离子体装置正在成为研究哨声波等波动的重要手段.

在地面等离子体装置中, 由于装置的几何尺寸与波动激发源的限制, 所产生波动的等相位面通常是螺旋状的, 形成螺旋波[21,22]. 本文利用中国科学技术大学线性磁化等离子体装置 (KLMP) 进行等离子体波动实验研究, 通过环形天线激发等相位面为螺旋状的波动. 在实验室等离子体中开展哨声波研究, 首先需要对产生波动的性质进行测量. 这里利用可移动的三维磁探针在垂直于波动传播方向的平面内扫描测量, 获得所产生波动的参数特性和演化特征, 证实了所激发的波动是等相位面为螺旋状的哨声波.

1　实验设置

KLMP 装置主体由真空室和轴向磁场线圈组成, 实验区主真空室直径为 25.5 cm, 长度约为 2 m, 真空室外嵌套 12 个轴向磁场线圈以产生一个均匀的轴向背景磁场. 装置采用钡氧化物阴极作为等离子体源, 选用脉冲工作模式, 周期为 1 s, 放电持续时间约 20 ms, 以获得均匀、稳定、较高密度的背景等离子体. 本实验采用氩气放电, 中性气压 0.04 Pa, 轴向背景磁场为 6 mT, 沿 $+z$ 方向. 产生的等离子体密度在 10^{18} m^{-3}量级, 电子温度约为 4 eV. 对应的典型等离子体参数有: 电子等离子体频率 $f_{\rm pe}$ 约为 9×10^9 Hz, 电子回旋频率 $f_{\rm ce}$ 约为 1.68×10^8 Hz.

如图 1(a) 所示, 在实验中选用了磁环天线沿径向伸入等离子体柱中激发波动, 通过旋转探针杆调整磁环天线法向可以改变激发螺旋波的模式. 通常在柱坐标系中描述螺旋波, 其本征模解可根据 KLOZENBERG 等[23] 的理论计算得到. 螺旋波方程的解在柱坐标的径向为驻波, 由贝塞尔函数描述, 轴向和方位角方向以正弦传播, 解的形式为 $B_z\propto J_m(k_r r)\exp[{\rm i}(m\phi+k_z z-\omega t)]$. 当天线法向平行于背景磁场时, 激发 m=0 模式螺旋波; 当天线法向垂直于背景磁场时, 激发 m=1 模式螺旋波. 在装置中设置了多个探针诊断平台, 采用三维磁探针和静电探针分别测量波动磁场和等离子体参量. 其中二维移动探针平台可扫描测量 xy 平面内波动和等离子体参数, 步进电机精细控制移动步长, 诊断空间分辨率 0.5 cm. 另外, 沿背景磁场 z 方向, 距离二维移动探针平面 20 cm 和 40 cm 再设置两组沿 x 方向扫描的一维动探针. 三组探针可配合测量波动在三维空间中的传播演化过程.

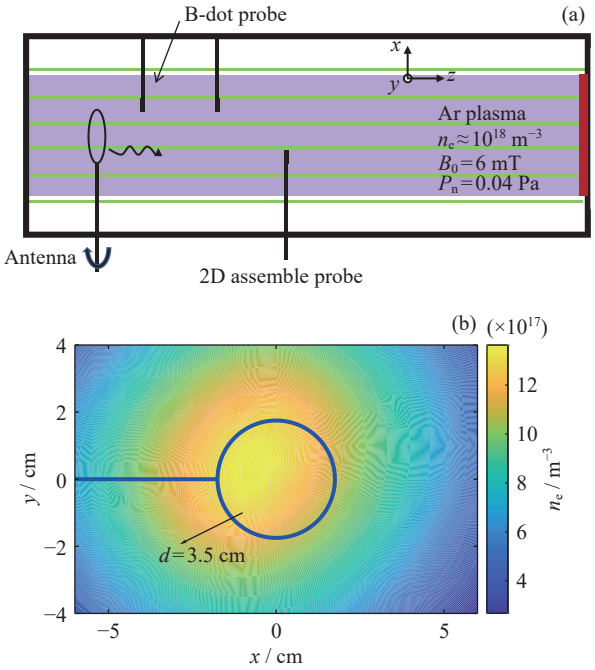


图 1 波动激发实验俯视效果 (a) 及等离子体密度剖面和天线位置 (b)

Fig. 1 Schematic diagram (top view) of the wave excitation experimental setup (a), and plasma density profile and antenna position (b)

在波动激发实验中, KLMP 装置中的背景等离子体呈中心对称的柱状等离子体, 在 xy 平面上的密度分布如图 1(b) 所示, 直径 3.5 cm 的磁环天线放置在等离子体密度中心附近. 在测量区间内, 等离子体沿轴向的密度衰减小于 10%, 波在传播过程中除振幅会随传播距离有一定衰减外, 波的结构有较好的连贯性和一致性. 激励天线同样采用脉冲工作模式, 在脉冲放电开始 5 ms, 等离子体柱稳定以后再同步触发工作, 每个脉冲包含约 20 个正弦波, 信号频率选用低频哨声波 ($<0.5 f_{ce}$) 频段. 实验中波动频率远小于等离子体频率 f_{pe}, 波动离开等离子体柱到达器壁难以再次进入, 探针测量的信号仅包含在等离子体中传播的波动. 由于氧化物阴极放电重复性好, 多次重复实验, 逐点扫描移动探针, 每点 10 次测量平均, 重构获得三维空间中的波动和等离子体参数信息.

2 实验结果

实验中磁环天线采用单一频率正弦波激发波动, 改变天线设置, 将天线法向平行或垂直于背景磁场方向进行实验, 分别激发 m=0 和 m=1 的螺旋波, 其磁

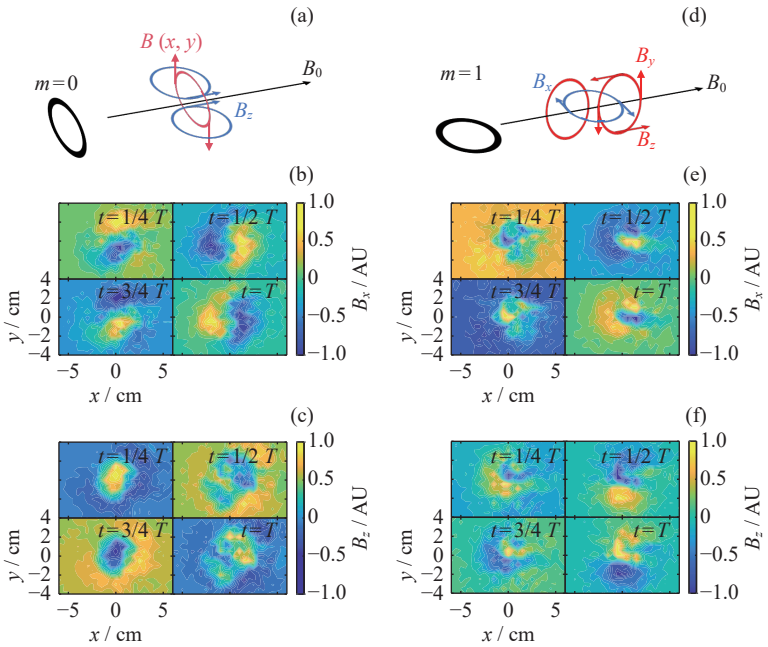


图 2 螺旋波磁场及 xy 平面内磁场测量结果. (a)~(c) m=0 螺旋波, (d)~(f) m=1 螺旋波, (a)(d) 磁场, (b)(e) x 方向磁场分量 B_x 随时间的变化, (c)(f) z 方向磁场分量 B_z 随时间的变化

Fig. 2 Magnetic field diagram of the helicon waves and the magnetic field measurement results in the xy plane. (a)~(c) m=0 helicon waves, and (d)~(f) m=1 helicon waves. (a) and (d) are the magnetic field diagram, (b) and (e) are the change of B_x with time, (c) and (f) are the change of B_z with time

场如图 2(a)(d) 所示, 并利用二维移动磁探针测量得到 xy 平面内波动磁场的演化信息. 由于 B_x 与 B_y 分布特征类似, 相差 1/4 周期, 故图 2 中仅给出了两种天线设置条件下的 B_x 和 B_z 分量随时间的分布变化, 选取时间间隔为 1/4 周期 (T/4). 图 2(b)(c) 表示天线法向平行磁场方向时的波动磁场, B_x 呈现双极分布, 围绕 z 轴旋转, 在中心处场强为零; B_z 呈现同心圆分布, 在中心处取极值, 符合 m=0 模螺旋波磁场的分布特征. 图 2(e)(f) 表示天线法向垂直磁场方向时的波动磁场, B_x 呈现同心圆分布, 在中心处取极值; B_z 呈现双极分布, 围绕 z 轴旋转, 在中心处场强为零, 符合 m=1 模螺旋波磁场的分布特征.

为进一步探究天线激发螺旋波的性质, 在 xy 平面上波动磁场矢量随时间的变化如图 3 所示. m=0 螺旋波的 xy 平面磁场矢量在绕中心成环和中心发散两种模式间交替变换, 如图 3(a) 所示; m=1 螺旋波的 xy 平面中心区域的磁场矢量沿逆时针旋转, 如图 3(b) 所示. 另外, 任一空间位置不同时刻波动磁场矢量均沿逆时针旋转, 背景磁场指向面外, 表明激发的波动是右旋偏振波. 对比图 3(c)(d) 中均匀等离子体背景条件下的螺旋波理论模型给出的 m=0 和 m=1 螺旋波磁场模型, 实验中等离子体柱的密度分布存在一定梯度, 不同空间位置的波动与理论模型存在细微差别, 但整体变化规律基本一致, 可证实激发的波动是右旋偏振的螺旋波.

由于在装置不同的轴向位置和径向位置都放置了探针, 波动信号为正弦单色波, 可以利用不同位置磁探针接收信号, 获得波包到达时间延迟以及相位延迟, 计算得到波动的群速度和相速度. 如图 4 所示, 以 43.5 MHz 的 m=0 螺旋波为例, 波动信号的相速

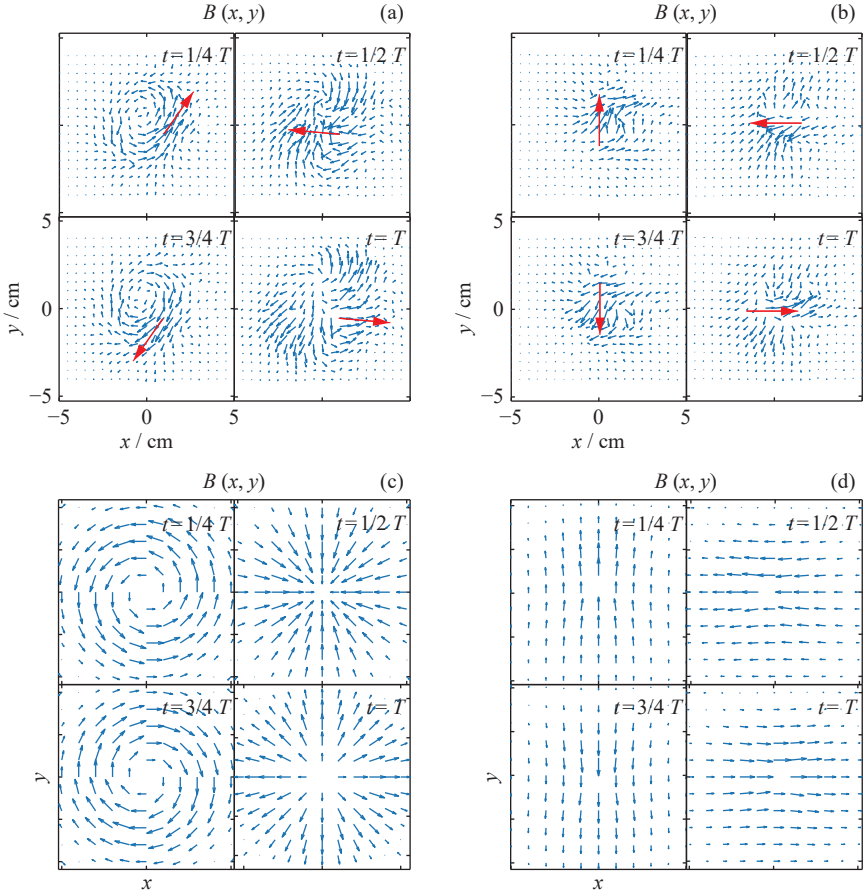


图 3　xy 平面内螺旋波磁场矢量随时间的变化. (a) m=0 实验测量结果, (b) m=1 实验测量结果, (c) m=0 理论模型, (d) m=1 理论模型

Fig. 3　Variation of magnetic field vector of helicon waves in xy plane with time. (a) m=0 experimental measurement results, (b) m=1 experimental measurement results, (c) m=0 theoretical model, (b) m=1 theoretical model

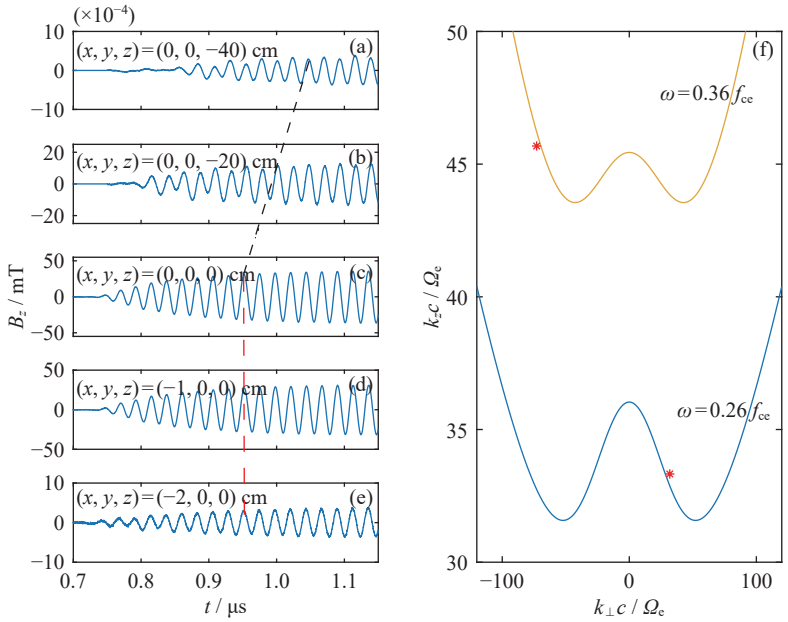


图 4 (a)～(e) 不同位置处波动磁场 B_z 的时序图, (f) 哨声波色散曲线与螺旋波实测数据点 (红点)

Fig. 4 (a)～(e) Timing diagram of the fluctuating magnetic field B_z at different positions, (f) whistler waves dispersion curve and experimental measurement data of helicon waves (red point)

度可以利用选定波峰到达不同探针的时间差来计算获得. 图 4(a)～(c) 显示的三个位置沿背景磁场 z 方向间距 20 cm, 可计算 $v_z = \dfrac{\Delta z}{\Delta t} = 2.33 \times 10^6\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, 图 4(c)～(e) 显示的三个位置沿 x 方向间距 1 cm, 可计算 $v_\perp = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = 2.44 \times 10^6\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, 由于激发频率已知, 同时可以获得波动的波长, $\lambda_z = 5.36$ cm, $\lambda_\perp = 5.61$ cm. 选取 43.5 MHz ($0.26 f_{ce}$) 和 60 MHz ($0.36 f_{ce}$) 的实验结果, 代入哨声波的色散关系. 归一化的波数曲线如图 4(f) 所示, 可以看出本实验所激发的右旋偏振螺旋波满足哨声波的色散关系, 是一支螺旋波形态的哨声波.

3 讨论

在 KLMP 装置中利用磁环天线激发低频哨声波波段的等离子体波动, 根据天线方向的不同, 激发不同模式的螺旋波, 开展了螺旋波形态哨声波特性的研究. 实验表明, 不同方向磁环天线分别产生了 m=0 和 m=1 的螺旋波, 并验证了该螺旋波具有右旋偏振特性. 进一步分析表明, 螺旋波色散关系与哨声波一致, 证明在实验室里产生了螺旋状的哨声波.

在实验室中产生的螺旋波哨声波, 与空间环境中常见的平面波哨声波都符合哨声波的色散关系. 根据等离子体波动的理论, 波动的传播等特性取决于色散关系, 故而实验室产生的螺旋波哨声波同样可用于空间中哨声波的研究. 因此, 本文验证螺旋波哨声波为进一步研究哨声波相关的空间等离子体物理过程打下了基础. 为更贴近空间中平面哨声波传播位形, 后续实验拟利用扁长的环天线, 等效为振幅和相位一致的一列环天线线性叠加[24,25], 在中国科学技术大学无碰撞磁场重联装置 (KRX) 上更大尺度的等离子体背景中激发平面哨声波. 此外, 卫星观测表明空间等离子体中存在大量的密度导管结构[26,27], 满足螺旋波约束的边界条件, 其中传播的哨声波可能是螺旋哨声波, 也需要进一步研究验证.

参考文献

[1] STENZEL R L. Whistler waves in space and laboratory plasmas[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, **104**(A7): 14379-14395

[2] LI W, THORNE R M, BORTNIK J, *et al*. Typical properties of rising and falling tone chorus waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(14): L14103

[3] KHOTYAINTSEV Y V, CULLY C M, VAIVADS A, *et al*. Plasma jet braking: energy dissipation and nonadiabatic electrons[J]. *Physical Review Letters*, 2011, **106**(16): 165001

[4] ZHANG X, ANGELOPOULOS V, ARTEMYEV A V, *et al*. Whistler and electron firehose instability control of elec-

tron distributions in and around dipolarizing flux bundles[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(18): 9380-9389

[5] WILDER F D, ERGUN R E, GOODRICH K A, *et al*. Observations of whistler mode waves with nonlinear parallel electric fields near the dayside magnetic reconnection separatrix by the Magnetospheric Multiscale mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(12): 5909-5917

[6] CONTEL O L, RETINÒ A, BREUILLARD H, *et al*. Whistler mode waves and Hall fields detected by MMS during a dayside magnetopause crossing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(12): 5943-5952

[7] WILSON III L B, SIBECK D G, BRENEMAN A W, *et al*. Quantified energy dissipation rates in the terrestrial bow shock: 1. Analysis techniques and methodology[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(8): 6455-6474

[8] TONG Y G, VASKO I Y, ARTEMYEV A V, *et al*. Statistical study of whistler waves in the solar wind at 1 au[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **878**(1): 41

[9] BORTNIK J, CHEN L, LI W, *et al*. Modeling the evolution of chorus waves into plasmaspheric hiss[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A8): A08221

[10] LI W, THORNE R M, BORTNIK J, *et al*. Characteristics of hiss-like and discrete whistler-mode emissions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(18): L18106

[11] MEREDITH N P, HORNE R B, GLAUERT S A, *et al*. Slot region electron loss timescales due to plasmaspheric hiss and lightning-generated whistlers[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A8): A08214

[12] SU Z P, XIAO F L, ZHENG H N, *et al*. STEERB: a three-dimensional code for storm-time evolution of electron radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A9): A09208

[13] NI B B, BORTNIK J, THORNE R M, *et al*. Resonant scattering and resultant pitch angle evolution of relativistic electrons by plasmaspheric hiss[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(12): 7740-7751

[14] LYONS L R, THORNE R M, KENNEL C F. Pitch-angle diffusion of radiation belt electrons within the plasmasphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, **77**(19): 3455-3474

[15] ABEL B, THORNE R M. Electron scattering loss in Earth's inner magnetosphere: 1. Dominant physical processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A2): 2385-2396

[16] LAM M M, HORNE R B, MEREDITH N P, *et al*. Origin of energetic electron precipitation >30 keV into the atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A4): 2009JA014619

[17] THORNE R M, NI B B, TAO X, *et al*. Scattering by chorus waves as the dominant cause of diffuse auroral precipitation[J]. *Nature*, 2010, **467**(7318): 943-946

[18] KASAHARA S, MIYOSHI Y, YOKOTA S, *et al*. Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves[J]. *Nature*, 2018, **554**(7692): 337-340

[19] URRUTIA J M, STENZEL R L. Helicons in uniform fields. I. Wave diagnostics with hodograms[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, **25**(3): 032111

[20] STENZEL R L. Whistler waves with angular momentum in space and laboratory plasmas and their counterparts in free space[J]. *Advances in Physics: X*, 2016, **1**(4): 687-710

[21] CHEN F F. Helicon discharges and sources: a review[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2015, **24**(1): 014001

[22] STENZEL R L, URRUTIA J M. Helicons in Unbounded Plasmas[J]. *Physical Review Letters*, 2015, **114**(20): 205005

[23] KLOZENBERG J P, MCNAMARA B, THONEMANN P C. The dispersion and attenuation of helicon waves in a uniform cylindrical plasma[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, **21**(3): 545-563

[24] STENZEL R L, URRUTIA J M. Comparison of electric dipole and magnetic loop antennas for exciting whistler modes[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, **23**(8): 082120

[25] STENZEL R L. Whistler modes excited by magnetic antennas: a review[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, **26**(8): 080501

[26] KE Y G, CHEN L J, GAO X L, *et al*. Whistler-mode waves trapped by density irregularities in the Earth's magnetosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(7): e2020GL092305

[27] CHEN R, GAO X L, LU Q M, *et al*. *In situ* observations of whistler-mode chorus waves guided by density ducts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(4): e2020JA028814

作者简介



唐　磊　男, 2001 年 11 月出生于四川省达州市, 现为中国科学技术大学地球与空间科学学院硕士研究生, 主要研究方向为实验室等离子体中的哨声波现象.
E-mail: tangl2018@mail.ustc.edu.cn



张乔枫（通信作者）　男, 1989 年 8 月出生于四川省成都市, 现为中国科学技术大学地球与空间科学学院实验师, 主要研究方向为等离子体激光诊断、基础等离子体实验、磁场重联实验、等离子体波动实验等.
E-mail: cdzqf@ustc.edu.cn