

金星磁尾大尺度等离子体涡流*

柴立晖 郭梦丹 唐晓淳

1(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 已有研究发现金星磁尾的太阳风氢离子 (H^+) 和金星电离层氧离子 (O^+) 存在大尺度涡流结构, 该涡流从磁尾望向星球是逆时针的. 为了确定该涡流的存在性, 利用金星快车等离子体和高能原子分析仪 (Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms on Venus, ASPERA-4) 的 Fedorov 校正数据, 分别在金星公转轨道坐标系 (VSO) 和太阳风电场坐标系 (VSE) 下对磁尾等离子体流进行了统计分析. 结果显示, 在 VSO 和 VSE 坐标系中都存在太阳风 H^+ 和金星 O^+ 的顺时针涡流结构. 但是从已有的研究结果看, 无论等离子体涡流是逆时针还是顺时针, 其产生的磁场都与已知磁尾磁场结构不相符; 考虑到金星和火星空间环境的相似性及火星磁尾太阳风 H^+ 并不存在完整等离子体涡流的情况, 认为金星磁尾可能并不存在大尺度等离子体涡流. 金星的等离子体特征需要未来更多卫星观测研究.

关键词 磁尾, 等离子体涡流, 磁场结构, 金星, 火星

中图分类号 P353

Large-scale Plasma Vortex in the Magnetotail of Venus

CHAI Lihui GUO Mengdan TANG Xiaozhun

1(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Using the observations by the Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms on Venus (ASPERA-4) onboard Venus Express, Previous studies found A large-scale plasma vortices of solar wind hydrogen ions (H^+) and Venus ionospheric oxygen ions (O^+) in the magnetotail of Venus. The vortex is counterclockwise when viewed from the tail towards the planet. We conducted a statistical analysis of the ASPERA-4 moment data calibrated by Fedorov to investigate the plasma characteristics in Venusian magnetotail. The statistical results showed that there are large-scale vortices of the solar wind H^+ and Venus ionospheric O^+ in both the Venus-Solar-Orbital (VSO) and Venus-Solar-Electrical (VSE) coordinate systems, but there are clockwise. Considering that neither counterclockwise nor clockwise plasma vortices can generate a magnetic field consistent with the observed magnetic structure in the Venusian magnetotail, and no complete plasma vortex is observed in the Mars magnetotail with a magnetic

* 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB41000000), 中国科学院青年促进会项目 (2020065) 和中国科协青年托举计划项目 (YESS20200152) 共同资助

2023-05-27 收到原稿, 2023-10-04 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/>)

structure similar to that of Venusian magnetotail, concluded that there may not be large-scale plasma vortices in the Venusian magnetotail, and that more satellite observations are needed in the future to investigate the plasma characteristics on Venus.

Key words Magnetotail, Plasma vortex, Magnetic field structure, Venus, Mars

0 引言

金星是太阳系中与地球最相似的行星, 其具有和地球最相近的质量、体积和日星距离. 但是, 金星地表环境极端恶劣, 地表气温约达 400°C , 气压约为 92 个地球标准大气压. 金星也没有像地球那样明显的内禀偶极磁场^[1], 使得金星的空间环境与地球截然不同^[2]. 地球的强偶极磁场会在地球周围形成一个巨大的磁层, 磁层顶日下点位置在 10 个地球半径处, 该磁层会保护地球大气和海洋不受太阳风的直接剥蚀. 因为金星没有明显的偶极磁场, 超音速的太阳风会直接与金星的高层大气和电离层发生相互作用, 导致部分金星的大气和水以离子的形式逃逸到太空中^[3]. 这种直接的相互作用还会在金星周围感应出一个小型的感应磁层, 磁层顶日下点位置约在 $1.1R_v$ (金星半径) 处^[4]. 金星与地球有截然不同的空间环境, 被认为是金星失去地表水, 并走上与地球不同的演化路径的可能原因之一^[5]. 因此, 金星是研究行星空间环境影响行星宜居性和内部演化的绝佳实验室. 金星与太阳风的相互作用一直是人造卫星的探测目标之一, 包括苏联的金星系列 Venera^[6-9], NASA 的金星先驱者号 PVO (Pioneer Venus Orbiter, 1978–1992)^[10,11] 和 ESA 的金星快车 VEX (Venus Express, 2006–2015)^[12] 等.

金星空间环境的整体形态与方向均由行星际磁场 IMF (Interplanetary Magnetic Field) 控制. IMF 和太阳风等离子体与金星电离层相互作用, 会在金星周围产生一个感应磁层和磁尾, 这些磁场能够加速、加热金星离子, 并使其逃逸. 向阳面的金星离子主要通过被太阳风对流电场 ($E_{\text{sw}} = -\mathbf{v}_{\text{sw}} \times \mathbf{B}$, $\mathbf{B}$ 为 IMF) 加速而逃逸. 由于金星重离子 (O^+) 的回旋半径与金星星球的半径相比, 在 $+E_{\text{sw}}$ 半球 (E_{sw} 指向星球外的半球) 会有更多的离子被太阳风拾起, 而在 $-E_{\text{sw}}$ 半球 (E_{sw} 指向星球内的半球) 大部分离子会回到金星电离层^[13]. 这会导致 $+E_{\text{sw}}$ 半球的感应磁层也更强^[14], 磁场结构也会变得不同^[15]. 最后在金星空间环境产生明显的 E_{sw} 不对称性. 金星空间的绝大部分

离子是从磁尾逃逸的, 磁尾的磁场结构与离子逃逸机制和速率都紧密相关^[16]. Zhang 等^[17] 发现金星磁尾也存在磁重联现象, 释放的磁能会加速等离子体, 并使其发生逃逸. 为了研究金星磁尾逃逸离子的能量和动量传输, Lundin 等^[18] 分析了金星磁尾的太阳风 H^+ 和电离层 O^+ 的速度特征, 发现在金星磁尾的太阳风 H^+ 和电离层 O^+ 存在一个逆时针旋转的涡流结构 (从磁尾望向星球). Lundin 等^[18] 指出太阳风 H^+ 与电离层 O^+ 存在明显的能量和动量的耦合. Lundin 等^[18] 发现了金星涡流的存在之后, Pérez-de-Tejada 等^[19] 研究了金星涡流位置随太阳周期的变化, Durand 等^[20] 也试图从物理原理角度推导出涡流的形成. 然而 Chai 等^[21] 指出金星快车在金星磁尾观测到的大尺度磁场结构, 与金星磁尾等离子体的大尺度涡流不相符. 考虑到磁冻结效应, 大尺度的等离子体运动会带着冻结在内的磁场一起运动, 从而改变原有磁场结构, 所以, 金星磁尾发现的大尺度等离子体涡流可能会引起金星磁尾磁场结构变化. 本文利用金星快车的等离子体和磁场观测数据, 在发现等离子体涡流的金星公转轨道坐标系 (Venus-Solar-Orbital, VSO) 和金星太阳风电场坐标系 (Venus-Solar-Electrical, VSE) 下, 分析了金星磁尾的等离子体流特征, 最后结合金星磁尾磁场结构和火星磁尾的等离子体观测, 讨论金星磁尾等离子体涡流的存在性.

1 数据与方法

金星快车上搭载了空间等离子体和能量原子分析仪 (Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms on Venus, ASPERA-4)^[22] 和磁强计 (Magnetometer, MAG)^[23], 用来研究金星的大气和电离层状况、粒子分布、磁场环境及金星与太阳风的相互作用. 金星快车于 2005 年发射, 2006 年入轨金星, 其轨道近地点在金星北极上空 250 km 附近, 远地点在金星南极上空 66000 km 附近, 轨道倾角为 105° ^[23]; 金星快车最终于 2015 年完全失去信号. 本文使用的是金

星快车在 2006—2014 年观测到的离子和磁场数据, 其中 ASPERA-4 的离子密度 n 和速度 v 是由 IRAP 的 Fedorov 校正. 只有当 $n < 0.01 \text{ cm}^{-3}$, 数据质量 $Q_{\text{flag}} < 0.6$ 的数据会被用来做统计分析*. 磁场数据 B 可从 ESA 网站下载.

分别在 VSO 和 VSE 坐标系下, 对 2006—2014 年间金星快车观测到的全部金星磁尾等离子体数据进行统计分析. VSO 坐标系的 x 轴指向太阳, y 轴指向行星公转轨道的反方向, 则 z 轴指向北极. 考虑到金星是自东向西自转的, $y > 0$ 为晨侧, $y < 0$ 为昏侧. VSE 坐标系的 x 轴指向太阳风速度 v_{sw} 的反方向, y 轴平行于行星际磁场 IMF 的横向分量, z 轴则指向太阳风电场 E_{sw} 的方向. 发布的数据一般是在 VSO 坐标系下的. 要研究行星的感应磁层和等离子体对 IMF 的响应, 需要将数据从 VSO 坐标系切换到 VSE 坐标系下. 将 VSO 坐标系绕 z 轴旋转 5° (金星公转速度与太阳风速度的正切), 使其 x 轴从指向太阳变为指向太阳风反方向; 绕 x 轴逆时针旋转使 y 轴平行于 IMF 横向方向. 这里需要鉴别每个轨道上卫星穿入和穿出弓激波的时间, 找到卫星穿入和穿出弓激波时上游 IMF 的观测值, 计算出穿入和穿出时两个 IMF 的平均值作为该轨道期间上游 IMF 的条件, 这里假定卫星在弓激波下游观测时上游的 IMF 不变.

统计分析金星等离子体流的密度和速度的平均分布时, 首先将金星三维空间分为 $0.1R_v \times 0.1R_v \times 0.1R_v$ 的网格, R_v 为金星半径; 然后将卫星在每个网格内观测到的数据求平均值; 为了显示区域等离子体流的分布特征, 选取某一区间内的网格, 并沿一个轴计算平均值, 最后将结果投影垂直于该轴的平面内. 利用以上方法, 本文统计分析了 VSO 和 VSE 坐标系内的金星磁尾等离子体流特征.

2 VSO 坐标系下金星等离子体流特征

图 1 给出的是金星周围观测到的太阳风 H^+ 和金星电离层 O^+ 的密度和速度总体分布, 颜色代表了物理量的强度, 其中白色为没有数据. 数据缺乏主要是由于卫星轨道不覆盖 (例如 H^+ 分布图) 或者没有有效数据 (例如 O^+ 分布图) 造成的. 当离子密度过低 ($n <$

0.01 cm^{-3}) 或数据质量较差 ($Q_{\text{flag}} < 0.6$) 时视为无效数据. 图 1 中, 横轴为太阳与金星连线上的径向距离 x , 纵轴为距离日金连线的横向距离 ρ , $\rho = \sqrt{y^2 + z^2}$, φ 为从 $-y$ 轴出发沿逆时针方向旋转的方位角. 由图 1 可以看出, 太阳风密度 n_{H^+} 在金星磁鞘 (黑色曲线以内) 和磁尾 (黑色方框以内) 都有明显增强, 密度增强区域的外边界与金星弓激波 (黑色曲线) 的位置符合得很好. 来自太阳风 H^+ 的径向速度 v_{x,H^+} 从磁鞘到磁尾 (黑色方框附近) 有明显减速, 横向速度 v_{y,H^+} 和 v_{z,H^+} 也是较为明显的. 金星 O^+ 密度 n_{O^+} 主要分布在金星 (黑色半圆) 周围和金星磁尾 (黑色方框以内), 磁尾 O^+ 的速度 (v_x, v_y, v_z) 分布与太阳风 H^+ 相似.

图 2 给出了金星夜侧 ($x < 0$) 观测到的太阳风 H^+ 和电离层 O^+ 的密度和速度的分布特征. 同样, 来自太阳风 H^+ 具有较为明显的横向速度 v_{y,H^+} 和 v_{z,H^+} , 且 v_{y,H^+} 在北半球 ($z_{\text{VSO}} > 0$) 主要指向昏侧 ($v_y < 0$), 在南半球 ($z_{\text{VSO}} < 0$) 主要指向晨侧 ($v_y > 0$); v_{z,H^+} 在晨侧 ($y_{\text{VSO}} > 0$) 主要指向北 ($v_z > 0$), 在昏侧 ($y_{\text{VSO}} < 0$) 主要指南 ($v_z < 0$). 即 v_{y,H^+} 和 v_{z,H^+} 的分布特征显示太阳风 H^+ 在夜侧磁尾有一个顺时针旋转的涡流存在 (从磁尾望向星球). 金星电离层 O^+ 密度 n_{O^+} 主要分布在金星 (内侧黑色圆圈) 周围和金星磁尾 (外侧黑色圆圈) 以内, 这里在金星北半球 ($z_{\text{VSO}} > 0$) 磁尾观测到的密度更大, 主要由于金星快车的轨道在北半球更靠近金星. 金星 O^+ 磁尾的速度 (v_x, v_y, v_z) 分布与太阳风 H^+ 较为一致.

太阳风 H^+ 和电离层 O^+ 在夜侧磁尾都存在一个顺时针涡流结构, 其中 H^+ 旋转速度约为 $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, O^+ 旋转速度约为 $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 图 2 显示的太阳风 H^+ 和电离层 O^+ 的磁尾涡流分布位置和速度大小都与文献 [18] 的观测基本一致, 但是涡流方向相反. 图 2 中涡流是顺时针的, 而文献 [18] 观测到的是逆时针的. 本文也采用过与文献 [18] 相同的时间段数据, 发现涡流特征与图 2 基本一致 (未在本文中呈现). 因此涡流方向的不同可能是矫正方法的差异造成的.

3 VSE 坐标系下金星等离子体流特征

图 3 与图 2 相似, 只是图 3 是在 VSE 坐标系中. VSE 坐标系的 y 轴平行于行星际磁场的横向分量

* <http://amda.irap.omp.eu>

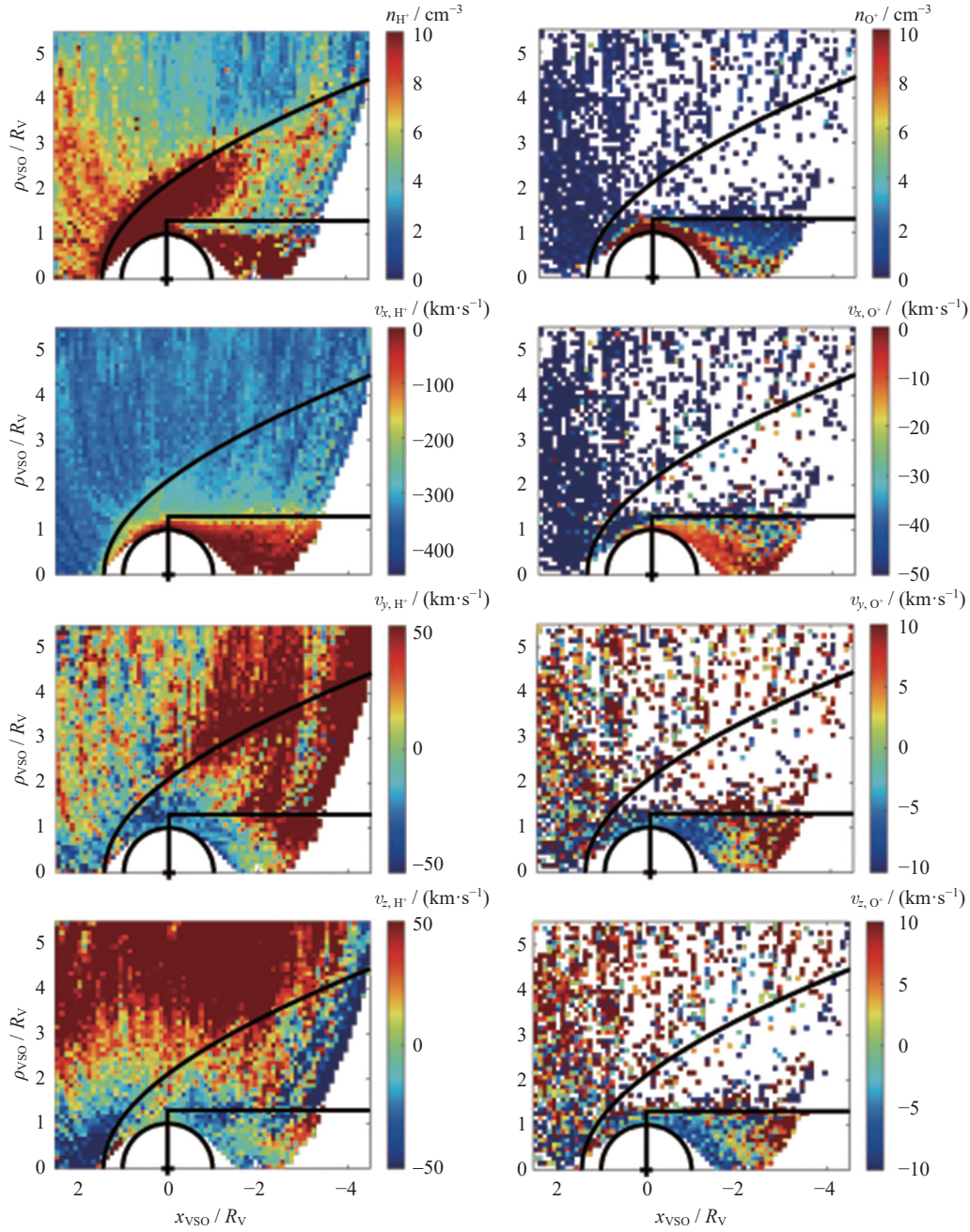


图 1 VSO 坐标系中金星快车在金星周围观测到的太阳风 H^+ 与金星电离层 O^+ 密度 n 和速度分量 (v_x , v_y , v_z) 的平均值分布 (VSO 坐标系为金星太阳风公转轨道坐标系. 黑色曲线代表金星弓激波位置^[24], 黑色矩形代表金星磁尾边界^[25], 黑色半圆代表金星)

Fig. 1 Average values of the density n and velocity components (v_x , v_y , v_z) of the solar wind H^+ and Venus ionospheric O^+ observed by the Venus Express around Venus in the Venus-Solar-Orbital (VSO) coordinate system (Outermost black curve represents the location of the Venus bow shock, the black rectangular box represents the boundary of the Venusian magnetotail, and the black semicircle represents Venus)

$B_{yz,VSO}$, z 轴平行于太阳风电场 E_{sw} . 将 E_{sw} 指向星球外部的半球 ($z_{VSE} > 0$) 称为 $+E_{sw}$ 半球; 将 E_{sw} 指向星球内部的半球 ($z_{VSE} < 0$) 称为 $-E_{sw}$ 半球, 并将沿

着 E_{sw} 的不对称性称为 E_{sw} 不对称性, 形成原理在引言中已给出. 由图 3 可以看出, 相比于 VSO 坐标系下结果, 在 VSE 坐标系中太阳风 H^+ 密度 n_{H+} 较为均匀

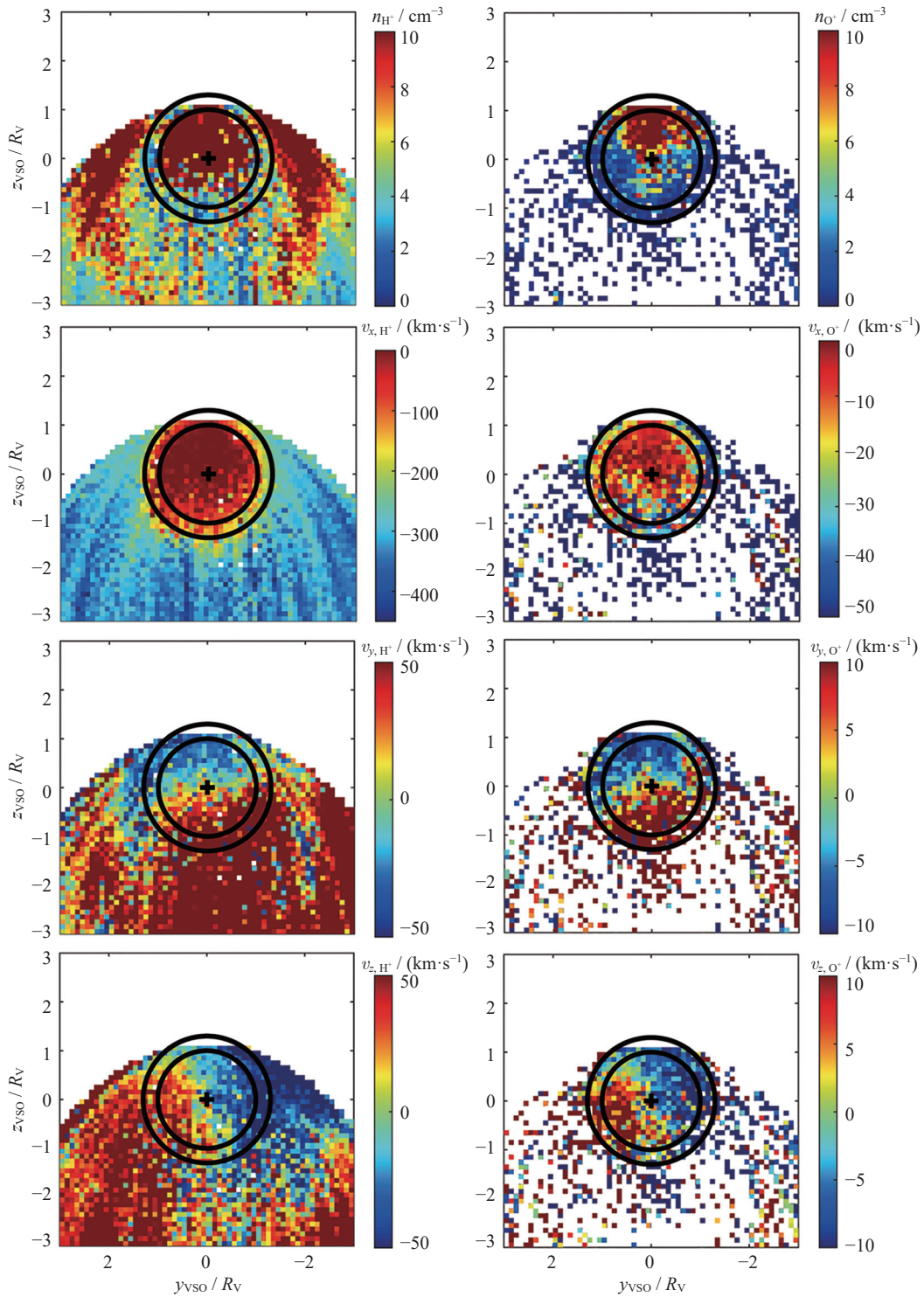


图 2 VSO 坐标系金星快车在金星夜侧 ($x < 0$) 观测到的太阳风 H^+ 与金星电离层 O^+ 密度 n 和速度分量 (v_x , v_y , v_z) 的平均值分布 (VSO 坐标系为金星太阳风公转轨道坐标系, 内侧黑色圆圈代表金星, 外侧黑色圆圈代表金星磁尾边界)

Fig. 2 Average values of the density n and velocity components (v_x , v_y , v_z) of the solar wind H^+ and the Venus ionospheric O^+ observed by Venus Express in the night side of Venus ($x < 0$) in the VSO (Venus-Solar-Orbital) coordinate system coordinate system (Inner black circle represents Venus, and the outer black circle represents the boundary of the Venusian magnetotail)

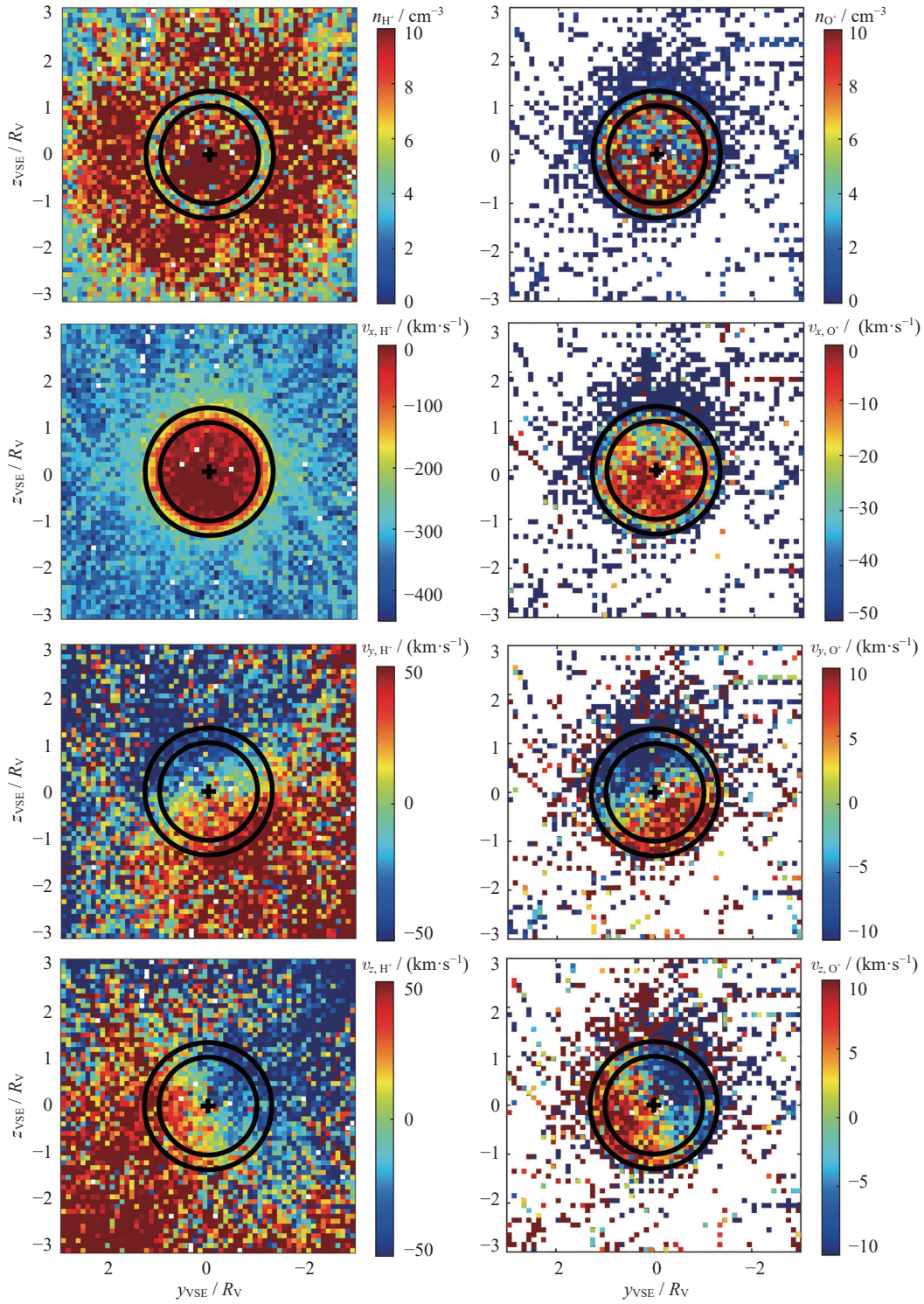


图 3 VSE 坐标系金星快车在金星夜侧 ($x < 0$) 观测到的太阳风 H^+ 与金星电离层 O^+ 密度 n 和速度分量 (v_x, v_y, v_z) 平均值分布 (VSE 为金星太阳风电场坐标系. 黑色曲线代表金星弓激波位置, 内侧黑色圆圈代表金星, 外侧黑色圆圈代表金星磁尾边界)

Fig. 3 Average density n and velocity components (v_x, v_y, v_z) of solar wind H^+ and Venus ionospheric O^+ on the nightside of Venus ($x < 0$) were observed by Venus Express in the VSE (Venus-Solar-Electrical) coordinate system (Inner black circle represents Venus, and the outer black circle represents the boundary of the Venusian magnetotail)

地分布在金星磁尾(外侧黑色圆圈以内)和磁鞘(外侧黑色圆圈以外、弓激波以内的区域),弓激波位置可由 n_{H^+} 陡然增强的最外缘确定.来自太阳风 H^+ 径向速度 v_{x,H^+} 从磁鞘到磁尾(外侧黑色圆圈以外到以内)有明显减速,并且在 $-E_{sw}$ 半球减速更为明显.在金星磁尾(外侧黑色圆圈)附近,太阳风横向速度 v_{y,H^+} 在 $+E_{sw}$ 半球大致反平行于行星际磁场横向分量($v_y < 0$),在 $-E_{sw}$ 半球大致平行于行星际磁场横向分量($v_y > 0$); v_{z,H^+} 在 $y_{VSE} > 0$ 半球大致平行于太阳风电场方向($v_z > 0$),在 $y_{VSE} < 0$ 半球大致反平行于太阳风电场方向($v_z < 0$).即在VSE坐标系中, v_{y,H^+} 和 v_{z,H^+} 的分布特征显示太阳风 H^+ 在夜侧磁尾大致存在一个顺时针旋转的涡流结构(从磁尾望向星球).但实际上以上离子的分布特征描述并不严格按照坐标轴界限分布,而是存在一定的斜率,对于这一点并没有很好解释.金星电离层 O^+ 密度 n_{O^+} 主要分布在金星磁尾(外侧黑色圆圈)以内和磁鞘的 $+E_{sw}$ 半球(外侧黑色圆圈外的 $z_{VSE} > 0$ 区域).电离层 O^+ 径向速度 v_{x,O^+} 在磁鞘的 $+E_{sw}$ 半球(外侧黑色圆圈外的 $z_{VSE} > 0$ 区域)的速度 $|v_{x,O^+}|$ 较大,而在磁尾的 $-E_{sw}$ 半球(外侧黑色圆圈内的 $z_{VSE} < 0$ 区域)的速度 $|v_{x,O^+}|$ 较小.由此可以看出, O^+ 的密度和径向速度存在明显的 E_{sw} 不对称性,这与以往研究发现的金星磁尾 E_{sw} 不对称性^[16]结果完全一致.电离层 O^+ 横向速度 v_{y,O^+} 和 v_{z,O^+} 的分布特征与太阳风 H^+ 的基本一致.

综上,在VSE坐标系中,太阳风 H^+ 和金星电离层 O^+ 在夜侧磁尾存在顺时针涡流结构.图3中太阳风 H^+ 和电离层 O^+ 的密度和径向速度(n_{H^+} , n_{O^+} 和 v_{x,H^+} , v_{x,O^+})的分布与以往研究结果^[16]较为一致;横向速度(v_{y,H^+} 和 v_{y,O^+})的分布显示,在VSE坐标系中,太阳风 H^+ 和电离层 O^+ 在金星磁尾存在大尺度涡流结构.

为研究金星VSE坐标系中的磁尾大尺度涡流结构是否存在 E_{sw} 不对称性,图4给出了 $|y_{VSE}| < 1$ 区域内太阳风 H^+ 和电离层 O^+ 的密度和速度的分布特征,并投影到 xz 平面.由图4可以看出,太阳风密度 n_{H^+} 在经过金星弓激波(黑色曲线)后有明显增强,在磁尾(黑色方框)密度分布没有明显的 E_{sw} 不对称性. H^+ 径向速度 v_{x,H^+} 从磁鞘到磁尾(黑色方框附近)有明显减速. H^+ 横向速度 v_{y,H^+} 在 $+E_{sw}$ 半球反平行于行星际磁场横向分量,在 $-E_{sw}$ 半球平行于行星际磁场横向

分量,且速度大小在 $+E_{sw}$ 半球和 $-E_{sw}$ 半球没有区别,即在 $\pm E_{sw}$ 半球 H^+ 的横向速度大小相同、方向相反.这说明在VSE坐标系中等离子体涡流结构没有明显的 E_{sw} 不对称性.由图3可知, v_z 的涡流特征是在 $\pm y_{VSE}$ 半球速度方向相反,因此图4中 $|y_{VSE}| < 1$ 区域内的平均会将涡流特征平均掉了.仔细观察可以看出, v_{z,H^+} 在磁尾有向日金连线 x 轴的汇聚特征,即在 $+E_{sw}$ 半球指向 x 轴($v_z < 0$),在磁尾 $-E_{sw}$ 也指向 x 轴($v_z > 0$).电离层 O^+ 密度 n_{O^+} 和径向速度 v_{x,O^+} 存在明显的 E_{sw} 不对称性,即电离层 O^+ 在磁尾 $+E_{sw}$ 半球密度 n_{O^+} 小、速度 v_{x,O^+} 大,在 $-E_{sw}$ 半球密度 n_{O^+} 大、速度 v_{x,O^+} 小,且这一趋势是从磁尾 $+E_{sw}$ 半球向 $-E_{sw}$ 半球逐渐变化的.该结果与前人发现的金星磁尾 E_{sw} 不对称性^[16]和火星磁尾 E_{sw} 不对称性^[26]结果都较为一致.电离层 O^+ 横向速度 v_{y,O^+} 和 v_{z,O^+} 的分布特征与太阳风 H^+ 基本一致,即:在VSE坐标系中,太阳风 H^+ 和电离层 O^+ 的磁尾涡流结构没有明显的 E_{sw} 不对称性.

4 VSO和VSE坐标系下的金星等离子体涡流

图5给出的是在VSO和VSE坐标系中,金星夜侧($x < 0$)观测到的太阳风 H^+ 和电离层的 O^+ 的横向速度($v_{y,z}$)的分布特征.由图5可以看出,无论是在VSO坐标系中还是在VSE坐标系中,太阳风 H^+ 和金星电离层 O^+ 的横向速度 $v_{y,z}$ 都存在明显的顺时针涡流结构.这里在VSO坐标系下的涡流结构,与Lundin等^[18]的研究结果非常相似,只是涡流旋转方向相反.图5中涡流是顺时针的,Lundin等^[18]观测到的是逆时针的.另从太阳风 H^+ 与电离层 O^+ 涡流结构都是在相同位置,环绕相同方向旋转的,由此看出太阳风离子与金星离子的运动是耦合在一起的.

通过对比图5可以看出,在VSO坐标系内环绕 x 轴的顺时针涡流结构,在VSE中依旧是环绕 x 轴顺时针的.这主要是因为VSE是VSO沿着 x 轴逆时针旋转而来,只是每次旋转的角度随着IMF的方向有不同,所以这种坐标系旋转不会改变涡流方向.

5 讨论

Lundin等^[18]提出,金星等离子体的大尺度涡流

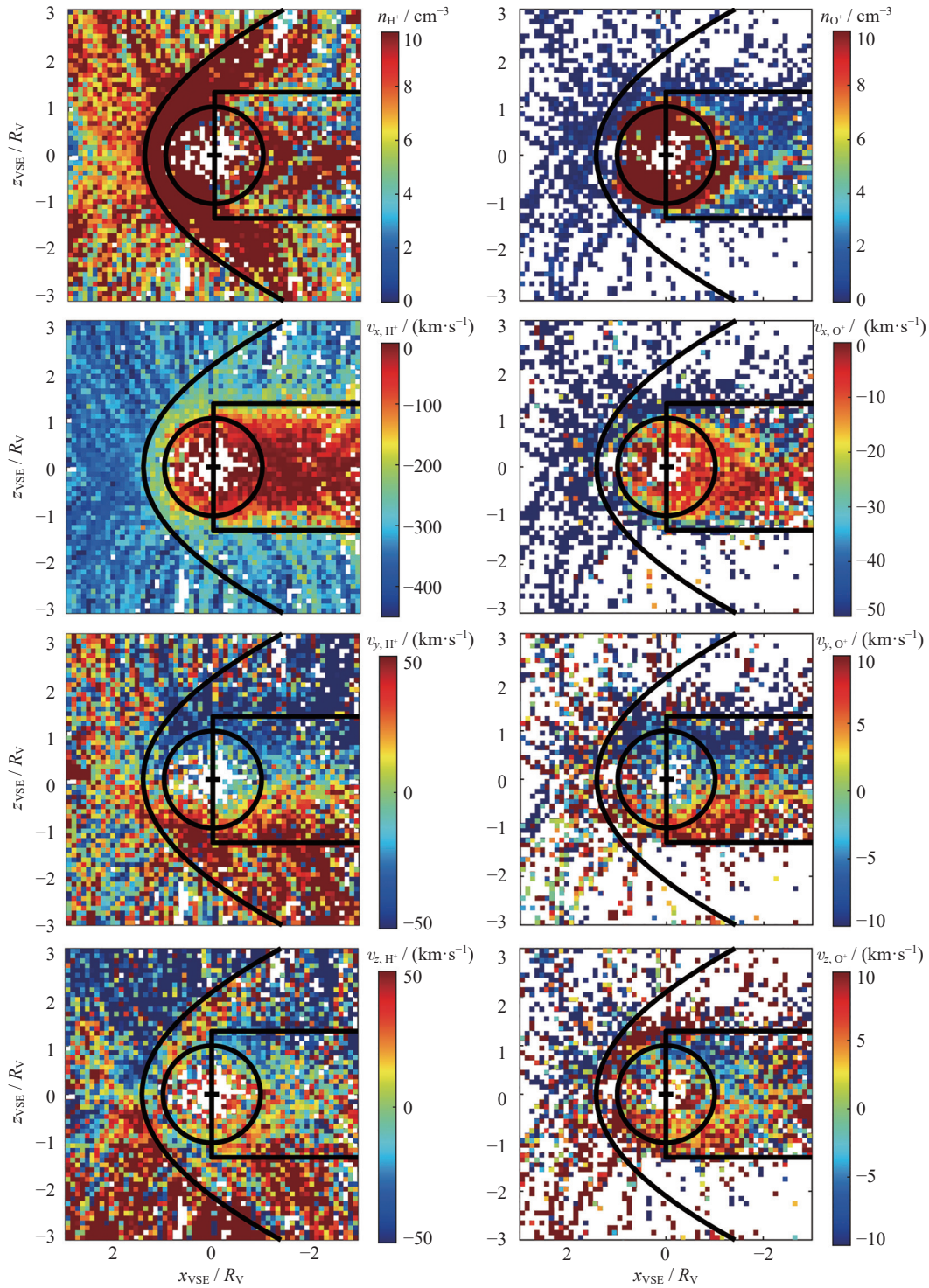


图 4 VSE 坐标系中金星快车在 xz 平面周围 ($|y| < 1$) 观测到的太阳风 H^+ 与金星电离层 O^+ 的密度 n 和速度分量 (v_x, v_y, v_z) 平均值分布 (VSE 为金星太阳风电场坐标系. 最外面黑色曲线代表金星弓激波位置, 黑色矩形方框代表金星磁尾边界, 黑色圆圈代表金星)

Fig. 4 Average values of the density n and velocity components (v_x, v_y, v_z) of the solar wind H^+ and the Venus ionospheric O^+ observed by Venus Express around the xz plane ($|y| < 1$) in the VSE (Venus-Solar-Electrical) coordinate system (Outermost black curve represents the location of the Venus bow shock, the black rectangular box represents the boundary of the Venusian magnetotail, and the black circle represents Venus)

不应该是金星独有的, 而应该在其他类似星体上也存在. 考虑到火星也没有明显的偶极磁场, 且具有和金星相似的空间环境, 这种大尺度涡流结构也应该存在于火星的磁尾中. Chai 等^[25] 分析了 MAVEN 卫星对火星夜侧的等离子体观测数据, 发现火星等离子体流在火星太阳风电场坐标系 (Mars-Solar-Electrical, MSE) 中存在大尺度结构, 但火星磁尾的太阳风 H^+ 流速是半涡流结构, 在 $y_{MSE} > 0$ 的区域为逆时针旋转, 在 $y_{MSE} < 0$ 的区域为顺时针旋转, 总体是绕过星球从 $+E_{sw}$

半球向 $-E_{sw}$ 半球运动^[25] (参考文献 [25] 图 3k). 正如 Chai 等^[25] 所述, 火星的这种大尺度等离子体结构 (参考文献 [25] 图 5 蓝色粗箭头标出) 会使冻结在其内磁场发生偏转, 最终使得火星磁尾磁场出现环形结构, 这种环形磁场结构与火星磁尾观测到的磁场是一致的, 即火星磁尾观测到的大尺度等离子体流与磁场结构是一致的.

金星上也观测到了与火星一样的环形磁场^[21], 因此要形成金星环形磁场结构, 金星磁尾的等离子体大尺度流也应该是与火星相似, 即在 $y_{VSE} > 0$ 的区域

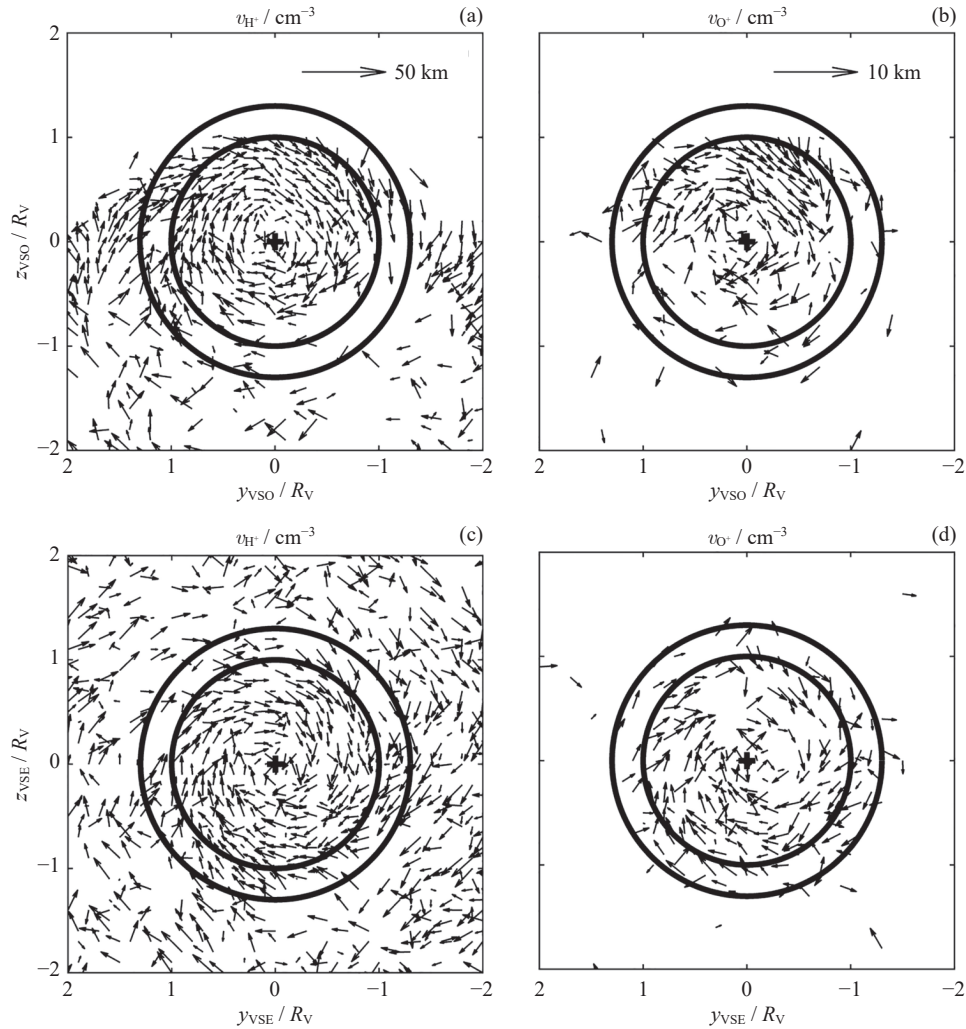


图 5 VSO 坐标系和 VSE 坐标系金星快车在金星夜侧观测到的金星磁尾太阳风 H^+ 和金星电离层 O^+ 的速度涡流 (箭头方向和长度分别表示速度 $v_{y,z}$ 的方向和大小, 内外圆圈分别代表金星和金星磁尾边界)

Fig. 5 Velocity vortices of the solar wind H^+ and the Venus ionospheric O^+ in the magnetotail observed by the Venus Express in the night side of Venus, in VSO coordinate system and VSE coordinate system (Direction and length of the arrows represent the direction and magnitude of the velocity $v_{y,z}$. The inner and outer circles represent Venus and the boundary of the Venusian magnetotail, respectively)

为逆时针旋转, 在 $y_{VSE} < 0$ 的区域为顺时针旋转. 这与本文给出的整个磁尾顺时针涡流结构不相符, 也与 Lundin 等^[18]得出的整个磁尾逆时针涡流不相符. 因此, 无论是 Lundin 等^[18]基于其校正数据得出的等离子体逆时针涡流, 还是本文基于 Fedorov 校正数据得出的等离子体顺时针涡流, 都与金星磁尾的观测到的磁场结构不相符.

需要指出的是, 德国马普所团队对 ASPERA-4 的等离子体校正数据只提供密度和速度大小, 没有提供速度的方向^[17]. 考虑到金星磁尾等离子体在日星连线的径向速度一般远大于垂直于日星连线的横向速度 ($v_x \gg v_{y,z}$), 本文对金星磁尾径向速度 v_x 的统计结果与 Dubinin 等^[16]基本一致是可以理解的, 即在金星磁尾的电离层 O^+ 速度大小 $|v_x|$ 或径向速度 v_x 都存在明显的 E_{sw} 不对称性 (见图 3 和图 4).

6 结论

通过分析 Fedorov 校正的 ASPERA-4 在金星周围的观测数据, 在金星磁尾发现等离子体横向速度 $v_{y,z}$ 在 VSO 和 VSE 坐标系中都存在整体的大尺度顺时针涡流结构, 这与 Lundin 等^[1]通过分析校正得到的离子密度和速度数据, 在 VSO 坐标系中发现的大尺度逆时针涡流结构的涡流方向是相反的^[1]. 通过分析 VSE 坐标系内的磁场结构, 本文发现这种整体的等离子体涡流结构, 无论是顺时针还是逆时针, 都与金星磁尾观测到的大尺度环形磁场结构不相符. 另外, 考虑到金星和火星空间环境的相似性, 金星和火星磁尾的等离子体流结构也可能存在相似性. 通过分析火星探测器 MAVEN 在火星周围的观测, Chai 等^[25]在火星磁尾观测到的太阳风等离子体的大尺度涡流结构为 $y_{MSE} > 0$ 区域逆时针旋转、 $y_{MSE} < 0$ 区域顺时针旋转, 这种等离子体流结构与火星磁尾观测到的大尺度环形磁场结构是相符的. 以上证据显示, 金星快车离子数据的不同校正过程, 得到的磁尾等离子体涡流方向是不一致的, 无论哪种涡流方向都与磁场结构相矛盾, 而且金星涡流结构与火星磁尾的等离子体流结构也不一致. 因此, 金星磁尾是否存在大尺度涡流还需更多观测和模拟验证.

金星等离子体的径向速度 v_x 和密度在 VSE 坐标系内的统计结果显示, 金星电离层 O^+ 径向速度 v_x 和

密度 n 都在 E_{sw} 电场方向存在明显的不对称性, 即金星电离层 O^+ 在磁尾 $+E_{sw}$ 半球的密度 n_{O^+} 较小、速度 v_{x,O^+} 较大, 而在 $-E_{sw}$ 半球密度 n_{O^+} 较大、速度 v_{x,O^+} 较小, 且这一趋势是从磁尾 $+E_{sw}$ 半球向 $-E_{sw}$ 逐渐变化的. 该结果与前人发现金星磁尾 O^+ 的速度大小 $|v|$ 和密度的分布存在明显的 E_{sw} 不对称性^[17] 基本一致 (这里由于 $v_x \gg v_{y,z}$, 可以认为 $v_x \approx |v|$, 也与火星磁尾 O^+ 的速度和密度的 E_{sw} 不对称性^[26] 基本一致).

综上所述, 金星快车观测到的金星离子速度分量 v_x 分布具有明显的 E_{sw} 不对称性, 这与前人分析以及火星的等离子体观测结果都相符; 然而金星离子速度分量 v_y 和 v_z 分布展现出的大尺度涡流结构与金星磁尾的磁场结构不一致, 也与火星的等离子体观测结果不一致. 因此, 金星磁尾的等离子体横向速度特征需要更多卫星观测和数值模拟研究.

致谢 使用的金星等离子体数据来自 <http://amda.irap.omp.eu>, 磁场数据来自 <https://archives.esac.esa.int/psa/ftp/VENUS-EXPRESS/MAG/>.

参考文献

- [1] RUSSELL C T, ELPHIC R C, SLAVIN J A. Initial Pioneer Venus Magnetic Field Results: Nightside Observations[J]. *Science*, 1979, **205**: 114-116
- [2] LUHMANN J G, LEDVINA S A, RUSSELL C T. Induced magnetospheres[J]. *Advances in Space Research*, 2004, **33**: 1905-1912
- [3] BARABASH S, FEDOROV A, SAUVAUD J J, *et al.* The loss of ions from Venus through the plasma wake[J]. *Nature*, 2007, **450**: 650-653
- [4] MARTINECZ C, FRÄNZ M, WOCH J, *et al.* Location of the bow shock and ion composition boundaries at Venus - initial determinations from Venus Express ASPERA-4[J]. *Planetary & Space Science*, 2008, **56**(6): 780-784
- [5] SMREKAR, SUZANNE E, ELLEN R S, *et al.* Venus: Surface and Interior[M]//Encyclopedia of the Solar System. 3rd. Boston: Elsevier, 2014: 323-341
- [6] GRINGAUZ K I, BEZRUKIKH V V, BREUS T K, *et al.* Plasma observations near Venus onboard the Venera 9 and 10 satellites by means of wide-angle plasma detectors[J]. *Proceedings of the International Symposium on Solar-Terrestrial Physics*, 1976: 918-932
- [7] KELDYSH M V. Venus exploration with the Venera 9 and Venera 10 spacecraft[J]. *Icarus*, 1977, **30**(4): 605-625
- [8] DOLGINOV S S. Magnetic fields in the vicinity of Venus according to "Venera" and "Mariner" data[C]//Planetary

- Institute Topical Conference. Houston: the Lunar and Planetary Institute, 1978(348): 22
- [9] VERIGIN M I, GRINGAUZ K I, GOMBOSI T, *et al.* Plasma near Venus from the Venera-9 and 10 wide-angle analyzer data[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 1978, **83**(A8): 3721-3728
- [10] RUSSELL C T. The Pioneer Venus Mission[M]. Washington D C: American Geophysical Union, 1992: 225-236
- [11] RUSSELL C T, LUHMANN J G, STRANGEWAY R G. The solar wind interaction with Venus through the eyes of the pioneer Venus Orbiter[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**: 1482-1495
- [12] TITOV D V, SVEDHEM H, TAYLOR F W, *et al.* Venus Express: highlights of the nominal mission[J]. *Solar System Research*, 2009, **43**(3): 185-209
- [13] LUHMANN J G, KOZYRA J U. Dayside pickup oxygen ion precipitation at Venus and Mars: spatial distributions, energy deposition and consequences[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 1991, **96**: 5457-5467
- [14] VILLARREAL M N, RUSSELL C T, WEI H Y, *et al.* Characterizing the low-altitude magnetic belt at Venus: complementary observations from the Pioneer Venus Orbiter and Venus Express[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2015, **120**(3): 2232-2240
- [15] RONG Z J, BARABASH S, FUTAANA Y, *et al.* Morphology of magnetic field in near-Venus magnetotail: Venus Express observations[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2014, **119**(11): 8838-47
- [16] DUBININ E, FRAENZ M, ZHANG T L, *et al.* Plasma in the near Venus tail: Venus Express observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(12): 7624-7634
- [17] ZHANG T L, LU Q M, BAUMJOHANN W, *et al.* Magnetic reconnection in the near Venusian magnetotail[J]. *Science*, 2012, **336**: 567-70
- [18] LUNDIN R, BARABASH S, FUTAANA Y, *et al.* A large-scale flow vortex in the Venus plasma tail and its fluid dynamic interpretation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(7): 1273-1278
- [19] PÉREZ-DE-TEJADA H, LUNDIN R. Solar cycle variations in the position of vortex structures in the Venus wake [J]. *Solar System Planets and Exoplanets*, 2021: 63-77. DOI:10.5772/intechopen.96710
- [20] DURAND-MANTEROLA HÉCTOR J, FLANDES A. Plasma vortices driven by magnetic torsion generated by electric currents in non-magnetic planetary wakes[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(10): 3902-3908
- [21] CHAI L H, WEI Y, WAN W, *et al.* An induced global magnetic field looping around the magnetotail of Venus[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2016, **121**(1): 688-698
- [22] BARABASH S, SAUVAUD J A, GUNELL H, *et al.* The Analyser of Space Plasmas and Energetic Atoms (ASPERA-4) for the Venus Express Mission[J]. *Planetary and Space Science*, 2007, **55**: 1772-1792
- [23] ZHANG T L, BAUMJOHANN W, DELVA M, *et al.* Magnetic field investigation of the Venus plasma environment: expected new results from Venus Express[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**: 1336-43
- [24] CHAI L H, FRAENZ M, WAN W, *et al.* IMF control of the location of Venusian bow shock: the effect of the magnitude of IMF component tangential to the bow shock surface[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2014, **119**(12): 9646-9475
- [25] CHAI L H, WAN W X, WEI Y, *et al.* The induced global looping magnetic field on Mars[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, **871**(2): L27
- [26] DUBININ E, MODOLO R, FRAENZ M, *et al.* The induced magnetosphere of Mars: asymmetrical topology of the magnetic field lines[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(22): 12722-12730

作者简介



柴立晖 女, 1988 年 11 月出生于甘肃天祝县。现为中国科学院地质与地球物理研究所副研究员、硕士生导师。主要研究方向为金星、火星和水星的空间环境、灾害性空间天气等。

E-mail: chailihui@mail.iggcas.ac.cn