

博士学位论文

火星剩余磁场对离子逃逸过程的影响



# Effects of the Martian Crustal magnetic fields on ion escape process

A dissertation submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

**Doctor of Philosophy** 

in Geophysics

By

Kai Fan

Supervisor

Professor Wei Yong

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of

Sciences

August 2020

# 中国科学院大学

# 研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作 所取得的成果。尽我所知,除文中已经注明引用的内容外,本论文不包含任何其 他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献 的其他个人和集体,均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名:

日 期:

## 中国科学院大学

## 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定,即中 国科学院有权保留送交学位论文的副本,允许该论文被查阅,可以按照学术研究 公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容,可以采用影印、 缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名:		导师签名:		
日	期:	日	期:	

## 摘要

四十亿年前,火星大气温暖湿润、存在液态海洋,与如今干冷的地表环境、 稀薄的大气条件大相径庭。因此,研究火星大气的损失通道,对于揭示火星气候 演化历史存在重要意义。其中,行星磁场和离子逃逸过程是影响行星大气物质组 成的重要因素之一。太阳风与行星磁层相互作用,直接或者间接得传递能量、动 量至行星大气中的离子成分,使其运动速度超过行星本体的束缚,发生逃逸。地 球内禀磁场可以通过磁层对流的方式将大部分出流离子输运回行星大气,从而减 少行星大气成分的损失。

火星在约三十八亿年前失去了全球性内禀磁场,离子逃逸经过几十亿年的累积效应,改变了火星大气的物质组成,是火星大气以及地表水的主要损失通道之一。而火星南半球区域性分布的地表剩余磁场,是研究行星磁场与太阳风能量传输过程的天然实验室。本文根据欧洲航天局Mars Express、美国航天局Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN (MAVEN)探测器采集的离子数据,分析了剩余磁场 (Crustal magnetic fields)对离子逃逸过程的影响,并量化和揭示了剩余磁场在火星离子逃逸、火星大气演化过程中发挥的重要作用。

本文根据2004至2016年,共计12年的Mars Express 观测数据以及2014至2018 年共计4年的MAVEN观测数据,对太阳风动压、太阳XUV辐射(X-ray and extreme ultraviolet radiation)、行星际磁场对离子逃逸通量的影响进行研究。MAVEN数据 首次在火星南半球观测到强剩余磁场上空300公里至700公里范围内,热氧离子

(30至30000电子伏特)的外流通量低值区。研究表明剩余磁场对氧离子的束缚 作用与离子回旋半径存在直接关系,当卫星高度提升、剩余磁场强度减弱时,磁 场对离子的束缚作用显著减弱。另外,当离子能量降低时,剩余磁场对离子的束 缚作用显著增强。这一现象暗示火星剩余磁场在一定程度上阻碍了低高度区域氧 离子的加速过程,并进一步证实火星剩余磁场对重离子的保护作用。

MAVEN数据显示,在火星南半球剩余磁场最强的区域,磁场不仅束缚了低 能重离子(小于30电子伏特),也阻碍了太阳风质子的注入。统计结果显示,当 剩余磁场伴随火星自转至向阳面午侧时,磁鞘中的太阳风流会被火星剩余磁场偏 转,导致强磁场上空观测到太阳风通量的低值区。当剩余磁场旋转至晨侧或昏侧

Ι

时,磁层中的重离子流也同样会被剩余磁场阻碍,其具体表现为重离子流的晨-昏不对称性。火星剩余磁场与太阳风相互作用在向阳侧呈现的南-北不对称性和 晨昏侧呈现的晨-昏不对称性,是剩余磁场对火星近地空间环境的主要影响。这 一现象我们统称为火星空间环境的二分性。这一二分现象表明火星剩余磁场能够 有效阻碍太阳风能量向火星电离层离子的传递,从而削弱了重离子的外流通量, 间接证实了行星磁场对行星大气的保护作用。

本文还少量涉及一些静电分析仪的探测原理及数据分析内容,主要是 Mars Express Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms 3(ASPERA-3)Ion Mass Analyzer (IMA)和 MAVEN Supra Thermal And Thermal Ion Composition

(STATIC)。有些内容涉及 MAVEN 探测器上其它几台仪器的数据,如 Solar Wind Ion Analyzer (SWIA), Solar Wind Electron Analyzer (SWEA), Langmuir 探针 (LPW) 和磁强计 (Magnetometer, MAG)。这些仪器提供的太阳风电子、电离 层电子、磁场强度信息共同佐证了火星剩余磁场对火星重离子,特别是氧离子和 氧分子离子的保护作用。

但是,当前探测手段和观测数据仍然存在局限,剩余磁场与离子逃逸的相关 研究尚有不少急需解决的问题。火星剩余磁场和行星磁场与太阳能量传输和大气 逃逸之间的量化关系,仍需未来数据的积累以待进一步的研究和探讨。

关键词:火星,剩余磁场,离子逃逸,行星大气演化

Π

## Abstract

It is believed that Mars had a liquid ocean on its surface 4 billion years ago and its atmosphere should be much warmer and wetter than at the present. However, nowadays Mars only contains a cold environment and a layer of atmosphere which is a hundred times thinner than the Earth's. Based on this massive disaster once happening in the Martian geologic history, it's crucial to investigate the escape channels and evaluate the total mass loss in the Martian upper atmosphere. Ion escape and planetary magnetic fields are two key parameters that affect escape processes and might change the atmospheric composition. Energy transformed from the Sun to the planetary particles and energized them to overcome the planet's gravity, these particles are finally being lost to the interplanetary space. An Earth-like dipole magnetic field could trap outflowing ions and deposit these particles into atmosphere through magnetospheric convection.

However, Mars lost its intrinsic dipole before 3.8 billion years ago, atmospheric loss through ion escape processes remove hundreds of tons' atmosphere in each second. The ion escape process was considered as one of the most important channels of the Martian water loss. The crustal magnetic fields on the Martian southern hemisphere provide an excellent chance to investigate the quantitative relationship between the planetary magnetic field and the total loss rates. This work with the aid of observations from the Mars Express mission and the the Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN (MAVEN) mission discussed the effect of the Martian crustal magnetic field on different ion species. Ion analyzer onboard both two missions provide valuable data to help us deeply understand the influences of the Martian crustal magnetic fields' contribution to the total atmospheric loss.

Data sets measured through the Mars Express mission covered 12 years' period from 2004 to 2016. Four years' observation were made from 2014 to 2018 through the MAVEN mission. This paper discussed the effects of energy drivers such as the solar wind dynamic pressure, solar XUV (X-ray and extreme ultraviolet radiation) irradiance, interplanetary magnetic fields, and the Martian crustal magnetic fields on global ion loss rates. Results reveal that there is a lower escape region of thermal oxygen ions (30-30000 eV) above the strong crustal magnetic fields region on the Martian dayside for the first time. Observations suggest the lower fluxes region mainly distributed between 300 to 700 kilometers and quickly attenuates with increasing altitudes. Statistical results show the gyro-radius of thermal oxygen ions are tens of times smaller in the regions of the strong crustal magnetic fields than the other. Local crustal magnetic fields trap heavy ions and protect them from being accelerated by the solar wind electric fields.

MAVEN data reveals that on the Martian southern hemisphere, the strongest part of the crustal magnetic field not only prohibits the solar wind's penetration into lower altitudes but also traps oxygen ions which energies below 30 eV. Considering the co-rotation effect of the crustal magnetic fields, there is a dawn-dusk asymmetry overhead the strongest crustal fields. The crustal magnetic fields form a local magnetosphere on the Martian dayside and deflect ambient plasma flows. Statistical results reveal there is a clear dawn-dusk asymmetry in oxygen fluxes while the crustal magnetic fields rotate to the dawn or to the dusk positions. We suggest there is a dichotomy between Mars northern and southern hemispheres. The crustal fields might trap low energy ions and prevent them from being accelerated, this 'shielding' effect of the crustal fields significantly protect Martian atmospheric ions from erosion by the solar wind.

Data sets used in this work are measured through the Ion Mass Analyzer (IMA) from the Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms 3 (ASPERA-3) set onboard the Mars Express and the Supra Thermal And Thermal Ion Composition (STATIC) analyzer onboard the MAVEN. This work also displays results observed by other instruments onboard the MAVEN, such as the Solar Wind Ion Analyzer (SWIA), the Solar Wind Electron Analyzer (SWEA), the Langmuir probe, and the magnetometer. These instrumets provide information of the solar wind electrons, ionospheric electrons and the magnetic fields. Observations from these instruments support our ideas that the crustal fields can effectively protect the Martian heavy ions (such as oxygen ions and moleculer oxygen ions) from being escape.

Nevertheless, there are a few of limitations in satellite detections and the huge intervel between each observation. The quantitative formula between the Martian crustal magnetic field and the ion escape rates is still not clear. The total energy-transportation from the Sun to the Martian heavy ions are waiting for a more

IV

detailed analysis in the future.

Key Words: Mars, Crustal Magnetic Fields, Ion Escape, Atmospheric Evolution

目 录

第1章	引言	1
1.1 火	星大气演化历史	1
1.2 火	星空间环境	3
1.3 离	子逃逸过程	6
1.3.1	加速机制	7
1.3.2	逃逸通道	8
1.3.3	离子逃逸率	20
1.4 火	星剩余磁场	22
1.4.1	探测历史	22
1.4.2	磁场模型	24
1.4.3	剩余磁场对离子逃逸的影响	25
1.5 本:	文工作的主要内容	26
<b>第</b> 2章	观测数据	28
2.1 <b>P</b>	星探测任务	28
2.1.1 1	Mars Express	28
2.1.2 1	MAVEN	30
2.2 静	电分析仪	31
2.3 <b>坐</b> 相	标系	
2.3.1	火星-太阳-轨道面坐标系	33
2.3.2	火星-太阳风电场坐标系	33
2.3.3	火星地理坐标系	34
2.4 离	子物理参数	34
2.4.1	Mars Express IMA	34

2.4.2	MAVEN STATIC	
第3章	剩余磁场对离子逃逸通量的影响	
3.1 Ma	ars Express 与 MAVEN 数据	
3.1.1	火星空间环境观测结果	
3.1.2	火星边界层模型	43
3.2 离	子逃逸的外部驱动源	
3.2.1	太阳风动压	
3.2.2	太阳 XUV 辐射	
3.2.3	行星际磁场	
3.3 剩	余磁场对离子逃逸的影响	54
3.3.1	全球逃逸通量	
3.3.2	太阳风-离子相互作用	55
3.4 讨	论	
3.5 <b>小</b>	结	67
第4章	剩余磁场与火星空间环境二分性	
4.1 南-	北不对称性	
4.1.1	离子分布的南-北不对称性	
4.1.2	逃逸通道的南-北不对称性	71
4.1.3	讨论	73
4.1.4	小结	77
4.2 晨	-昏不对称性	
4.2.1	离子分布的晨-昏不对称性	
4.2.2	2017 年 4 月 27 日穿越事件	83
4.2.3	讨论	
4.2.4	小结	

第5章 总结与展望	93
5.1 研究总结	93
5.2 未来展望	95
参考文献	
致 谢	
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	

## 第1章 引言

行星大气环境是衡量地外生命是否存在的主要因素之一,尤其是与地球类似 的氧气成分在行星大气中占据的比重,是维持生物生存的重要条件(e.g.,Wei et al.,2014; Poulsen et al.,2015)。离子逃逸是行星大气的主要损失方式之一,能够 改变逃逸成分在行星大气中占据的比例。火星半径约为地球的53%,表面重力约 为地球的五分之二,大气较地球而言非常稀薄。由于缺少类似地球的全球性偶极 磁场,火星大气几十亿年来一直被太阳风剥蚀,这一过程可能是火星古海洋消失 的主要原因之一(e.g., McElroy et al.,1977; Lundin et al.,2007)。然而,火星南半 球存在较强的区域性剩余磁场,其磁场强度足以影响火星日侧磁层顶的高度。因 此,研究剩余磁场对太阳风-火星磁层相互作用过程的影响,对于理解太阳风能 量传输和火星离子逃逸存在非常重要的意义。同时,也为研究全球性偶极磁场与 太阳风之间的相互作用提供新的思路。

本章将对行星大气演化和逃逸过程进行梳理概括,然后简单介绍火星空间环 境和火星离子逃逸过程,接着简要概括火星剩余磁场的探测历史和文章中使用的 火星剩余磁场模型,最后总结和归纳本文的研究重点,对研究意义及其重要性进 行简要说明。

#### 1.1 火星大气演化历史

人类对行星大气起源问题的认识是一个非常艰难的过程。迄今为止,人类在 火星上开展的卫星就位探测已有五十余年的历史。当前认为,火星与地球的原始 大气成分类似,但是经过 40 亿年的演化火星最终失去了原始大气中几乎全部的 水和大部分的二氧化碳 (Kulikov et al., 2007)。离子逃逸过程和行星磁场在火星 大气演化和水损失过程中发挥的具体作用,是当前研究的热点。

目前采集到的来自火星表面地质活动、火星陨石、火星大气等一系列观测证 据和模型模拟结果显示,火星幔岩浆洋的分异过程约在 45 亿年前结束,去气效 应产生了约 85 巴(bar)的水蒸汽和约 10 巴的二氧化碳(Lammer et al., 2018), 但是,这些成分在之后的 18 个百万年里迅速损失。



图 1.1 火星大气演化历史重要事件示意图 (Jakosky et al., 1997)

在 40 亿年前的诺亚纪(Noachian),火星火山活动旺盛,在南部高原形成了 如萨希思(Tharsis)大火山省的隆起(Phillips et al., 2001)。仅萨希思隆起便释 放了约 3 x 10<sup>8</sup> 立方千米的二氧化碳和水蒸气,这些火山活动使当时的火星大气 温暖潮湿。然而,在 38 至 35 亿年前的西方纪(Hesperian),火星环境发生了剧 烈的变化,火星的全球性磁场消失,大约三分之二的水通过大气损失的方式逃逸 至宇宙空间(Jakosky et al., 2001)。

另一方面,在整个西方纪,地质活动使大气中的二氧化碳、水蒸气、二氧化 硫等成分进入粘土矿物储存在火星表面(Ehlmann et al., 2011)。于此同时,大量 的水被搬运至位于火星北半球的低地势平原区域,形成了一个里海规模的湖泊。 但是,自31亿年前至今的火星亚马逊纪(Amazonian)时期,火星表面和大气中 残存的水分在地质活动、太阳风、太阳 XUV 辐射的共同作用下,已经基本消失。 火星环境与今日观测到的结果类似,干、冷、地质活动和撞击事件较少、大气层 在大气逃逸的作用下逐渐损失,日益稀薄。

当前观测数据显示,火星表面大气压约为 0.6 豪巴(mbar),仅是当前地球 大气压的 0.6%。根据 MAVEN 探测器的氩同位素结果显示,40 亿年前火星表面 的大气压约为 0.5 巴(Jakosky et al., 2017),意味着火星损失了约 90%以上的大 气物质成分。其中,太阳风和太阳 XUV 辐射驱动的离子逃逸过程是火星大气损

失的主要机制之一。



图 1.2 火星大气主要成分演化历史(Lammer et al., 2018)

#### 1.2 火星空间环境

从20世纪70年代开始,人类向火星发射人造卫星对火星开展就位探测。1965 年美国"水手4号"(Mariner 4)探测器在飞越火星的过程中首次探测到了火星 的弓激波和磁层边界,并对火星电离层电子密度剖面进行了测量,这是人类历史 上首次成功抵达火星轨道的探测器。1971年前苏联"火星"(Mars)系列探测器 较为详细的对火星弓激波、磁鞘(Magneto sheath)和磁层进行了测量。1976年 着陆的美国"海盗计划"(Viking Project)是火星探测历史上的里程碑,其着陆 过程中首次测量了火星大气密度、温度剖面。1989年,前苏联"火卫一2号" (Phobos 2)探测器首次对火星夜侧空间环境进行探测,并对离子的逃逸通量进 行了估算。1997年,美国"火星全球勘测者"探测器(MGS, Mars Global Surveyor) 首次发现火星表面存在剩余磁场,并于1999年变轨,对剩余磁场与电离层进行

经过近 50 年的努力,人类对火星空间环境的认知取得了重大进展。

观测结果显示,火星缺少与地球类似的全球性的内禀磁场,其大气层直接暴露在平均速度约为300-400(km s<sup>-1</sup>)的太阳风中。当太阳活动性较弱时,太阳风电场和快速变化的行星际磁场使良导性的火星电离层产生感应电流,形成感应磁

详细观测。2004年,欧洲航天局"火星快车"计划首次在火星探测到极光现象。

层(Induced Magnetosphere);太阳风流被感应磁层偏转,经晨昏分界线至火星 夜侧,形成等离子体尾瓣。这一系列的过程使火星形成了如图 1.3 所示的空间环 境(Brain et al., 2017)。

当太阳活动性较强、或者火星遭遇日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)等极端空间天气事件时,太阳风和行星际磁场对火星电离层的压缩急剧 增强,使整个火星磁层迅速收缩。



图 1.3 火星空间环境 (Brain et al., 2017)

火星弓激波在日下点的平均高度位于 1.6 个火星半径,在晨昏线处可达 2.6 个火星半径,这一尺度相对于火星重离子的回旋半径而言较小,充分加速的重离 子回旋半径可达几至几十个火星半径的量级。在此区域中,太阳风动压占据主导, 火星逃逸层的中性粒子电离(电荷交换、光质电离)后直接被太阳风加速,进而 逃逸(e.g, Luhmann et al., 1991)。

火星磁鞘中的主要成分是被弓激波减速的太阳风等离子体,其特征是太阳风 等离子体热压迅速升高。磁鞘中的行星际磁场逐渐"堆积"在火星附近,形成一 个磁堆积区(Magnetic Pile-up Boundary),被认为是火星磁鞘与感应磁层的边界 区域(Cloutier et al., 1999)。然而,这一边界层的定义目前仍有争议,观测和模 拟结果对这一边界层的认识也在不断加深,其特征包括太阳风质子数的锐减、磁 层重离子密度的突增、磁场波动性的减少等等(e.g, Bertucci et al., 2011)。目前 认为,这一过渡区域满足压强平衡条件,即过渡区两侧的热压和磁压之和守恒。



图 1.4 无内禀磁场天体感应磁层示意图(Luhmann et al., 2004)

行星际磁场堆积区以内,是火星感应磁层。此区域中的主要成分是源自火星 电离层的重离子,一般认为这一区域是火星离子逃逸的主要通道(Lundin et al., 1989)。如图 1.4 所示,火星感应磁层与金星类似,可以解释为良导性的火星电 离层感受到运动的太阳风电场和快速变化的行星际磁场形成全球性感应电流,从 而阻碍了行星际磁场的进一步渗透(Luhmann et al., 2004),这一理论与目前火星 磁层观测结果较为吻合。





火星日侧电离层在 200 公里以上区域中的主要成分是氧离子和氧分子离子, 如图 1.5 所示。200 公里也是火星大部分中性成分逃逸层底(exobase)的高度, 在此高度之上,中性粒子间的碰撞可以忽略不计(e.g., Nier and McElroy, 1976)。 火星电离层的氧离子和氧分子离子除了被太阳辐射直接电离外,主要参与以下光 化学反应过程(e.g., Nagy et al., 2004):

$$CO_2 + hv \rightarrow CO_2^+ + e$$
  
 $CO_2^+ + O \rightarrow O_2^+ + CO$ 

$$CO + O_2^+ \rightarrow O^+ + CO_2$$
  
 $O^+ + CO_2 \rightarrow O_2^+ + CO$ 

上述光化学反应中产生的氧离子,氧分子离子和二氧化碳分子离子,是火星 磁层离子的主要来源,也是火星离子逃逸的主要成分。由于火星引力较弱,在逃 逸层底以上的高度,氧离子的能量只需达到 2.1 电子伏特(eV)即可发生逃逸(e.g., Barabash et al., 2007)。



图 1.6 火星磁尾离子分布图 (Barabash et al., 2007)

磁尾是火星低能重离子逃逸的主要通道之一,感应磁层在火星夜侧形成的磁 尾电流片汇聚了大量从日侧输运至夜侧的火星重离子。其中,磁尾电流片的形状 主要取决于行星际磁场的方向,观测结果显示,火星磁尾电流片在火星-太阳风 电场坐标系下呈现明显的南-北不对称性(e.g., Barabash et al., 2007),如图 1.6 所 示。

#### 1.3 离子逃逸过程

火星高层大气直接暴露在太阳风中,火星的离子逃逸过程遍布整个火星空间:从弓激波到电离层,从日侧几十个火星半径的逃逸层(exosphere)到夜侧火星磁尾。20世纪70年代首次开展火星探测以来,仅有三颗卫星对逃逸离子进行了直接测量:1989年"火卫一2号",2004年"火星快车"计划,2014年MAVEN探测器。随着探测技术的进步,人们对离子逃逸过程的认识也逐步加深,并将火星离子逃逸大致划分为三个区域:逃逸层、"羽状通道"(plume)和火星磁层。 其中,逃逸层导致的离子逃逸损失总量至今尚未从观测上得到统计估算。由本章

大气成分的重要损失通道,离子逃逸过程需要详细的理解和研究。

#### 1.3.1 加速机制

目前火星仅存稀薄的大气,不存在全球性内禀磁场,因此,太阳风与火星高 层大气之间的大尺度相互作用,可以使用 MHD (Magneto Hydro Dynamics)条 件进行近似描述。其中,将磁流体动量方程中的库伦碰撞和离子-中性碰撞的作 用忽略,火星磁层多离子成分的离子动量方程可以写为:

$$\rho_i \frac{\left(\vec{v}_i\right)}{\partial t} + \rho_i \left(\vec{v}_i \cdot \nabla\right) \vec{v}_i = \rho_i G - \nabla P_i + n_i q_i \left(\vec{E} + \vec{v}_i \times \vec{B}\right) \quad (1-1)$$

根据广义欧姆定律,电场 E 可以表示为:

$$\vec{E} = -\frac{\nabla P_e}{en_e} - \vec{v}_e \times \vec{B}$$
(1-2)

将电子速度 ve可用电流密度表示为:

$$\vec{\mathbf{v}}_{e} = \vec{v}_{p} - \frac{\vec{J}}{en_{e}}$$
(1-3)

将 1-2 和 1-3 代入 1-1 式右侧第三项,则离子受到的电磁力可以表示为:

$$\vec{F} = -\frac{n_i}{n_e} \nabla P_e + n_i e \left( \vec{v}_i - \vec{v}_p \right) \times \vec{B} + \frac{n_i}{n_e} \vec{J} \times \vec{B}$$
(1-4)

其中, vp表示伴随流体运动的等离子体的平均速度,相对于太阳风流而言, 火星临近空间的重离子运动速度 vi可以忽略不记。因此,公式1-4 中第二项太阳 风电场可以表示为: -v×B,即火星重离子"感受"到了一个运动的电场,进而 被其加速。公式1-4 的其余两项分别是电子的压力梯度力和 J×B,前者主要分 布在磁鞘区域、后者可分解为磁压力和磁张力。太阳风对火星重离子的加速过程 从大尺度而言主要由上述三项作用力贡献。

除此之外,一些局部性加速过程,也可以使离子获得能量从而逃逸。如发生 在火星弓激波、感应磁层磁场堆积区等不稳定边界层附近的波动,如果与离子回 旋频率一致也可以对离子进行加热(e.g., Dubinin et al., 2011)。另外,火星剩余 磁场重联也会使闭合磁力线携带的等离子体发生整体性逃逸(e.g., Brain et al., 2010),剩余磁场"极隙区"可以形成与地球类似的极化电场使重离子上行逃逸 等等 (e.g., Lundin et al., 2006)。这些内容将在 1.3.2 章节结合逃逸通道进行介绍。

1.3.2 逃逸通道

根据目前观测结果,离子的逃逸过程自弓激波以内可以大致划分为:

1, 被太阳风-v×B电场"拾取"的 pickup 离子; (弓激波 - 磁鞘 - 磁层 - 电 离层上边界)

2, 磁层中的尾向离子流及动量传输模型近似; (磁层)

3,离子直接从电离层开始的逃逸,例如'极风'(Polar Wind)、重离子跨晨 昏线流(Trans-terminator ion flow); (电离层)

4, 电流片(Current sheet)的尾向离子流;(磁尾)

5,由火星剩余磁场引发的逃逸,例如磁场重联、开放磁力线"极隙区"(cusp) 结构造成的逃逸等;(偶发性事件)

6, CME、太阳共转相互作用区(CIR, Co-rotating Interaction Region)等空间天气事件导致的离子逃逸。(偶发性事件)

本部分将会对上述六种逃逸通道进行简单介绍。其中,空间天气事件为离子 逃逸提供了额外能量来源、导致了离子的"额外"损失,所以在本部分单独列为 一项进行介绍。

1.3.2.1 pickup 离子

相对太阳风流静止的离子被太阳风电场加速可以根据单粒子运动理论进行 近似描述。一个新生离子被太阳风-v×B电场加速并根据行星际磁场方向回旋, 离子运动轨迹类似 $E \times B$ 漂移,最高可加速至  $2 v_{sw} sina$ 。其中  $\alpha$  是磁场和太阳风 速度方向的夹角;引导中心的的漂移速度可由  $E \times B/B^2$ 给出。



图 1.7 pickup 离子运动轨迹(Coates et al., 2003)

火星高层大气中的离子直接暴露在太阳风运动电场之中,因此相对太阳风流静止的电离层离子被-v×B电场加速。观测结果显示,离子会在太阳风电场正方向沿离子回旋拉莫半径(Larmor radius)轨迹分布"羽状通道"(plume)。这些pickup离子的主要来源是日下点附近的电离层离子。MAVEN观测结果如图 1.8 所示。另外,Dubinin 根据 Mars Express 卫星的离子观测数据,于 2011 年对火星磁层和磁鞘区域观测的 0.5 个火星半径展宽的"羽状通道"内 pickup 通量进行统计,并据此估算出此通道的氧离子逃逸率约为 5×10<sup>22</sup>–10<sup>23</sup> (s<sup>-1</sup>)。



图 1.8 火星 pickup 氧离子的"羽状通道"(Dong et al., 2015)

上述现象在 19 世纪 80 年代于金星上观测到了类似离子逃逸过程,并随后由 计算机模拟对观测结果进行模拟(e.g. Moore et al., 1990)。其中,不同离子成分 会因其分子质量的不同,在太阳风电场的加速过程中,逐渐分离,沿各自不同的 回旋半径留下运动轨迹,如图 1.9 所示。模拟结果显示,离子在-*v*×*B* 正方向半 球会逐渐被太阳风加速,最终逃逸损失;而在负方向半球,离子会重新回到大气 中与中性成分碰撞损失(e.g. Jarvinen et al., 2015)。MAVEN 探测器的结果如图 1.10 所示,离子在电场正方向上呈现明显集中。另外,MAVEN 统计该通道内大 于 25eV 的氧离子逃逸通量约为 1.7 - 2.3 × 10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>) (Dong et al., 2015)。



图 1.9 pickup 离子的有限回旋半径现象 (Jarvinen et al., 2015)

值得一提的是,由于火星引力较弱,中性氧原子形成的逃逸层可达几十个火 星半径。这些中性氧原子电离后被太阳风 pickup 加速达到 keV-MeV 的量级,并 可能撞回火星大气引起中性成分的溅射逃逸。这些高能 pickup 离子在火星向阳 面附近同样被 MAVEN 探测器的观测结果所证实(Rahmati et al., 2016)。



图 1.10 pickup 离子沿太阳风电场方向形成的半球不对称现象(Dong et al., 2015)

#### 1.3.2.2 磁层与动量传输模型

火星磁层中主要分布着来源于火星电离层的重离子,这些离子与太阳风流相 互作用、加速逃逸。磁层动量传输模型是一种在理想条件下对磁层离子逃逸率进 行简单估算的方法,主要考虑太阳风质子和磁层重离子的动量传输关系,下面对 这一理论进行简要介绍:

从双流体 MHD 理论出发,假设太阳风-火星磁层的相互作用仅为太阳风质 子-火星氧离子两种粒子间的相互作用,则忽略压强梯度力,其动量方程可以写 为:

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = e \frac{n_o}{n_e} \left( \vec{V}_p - \vec{V}_o \right) \times \vec{B} + \frac{\vec{J} \times \vec{B}}{\mu_0 n_e}$$
(1-5)

$$m_o \frac{d\vec{V_o}}{dt} = e \frac{n_p}{n_e} \left( \vec{V_o} - \vec{V_p} \right) \times \vec{B} + \frac{\vec{J} \times \vec{B}}{\mu_0 n_e}$$
(1-6)

假设 $J \times B$ 的影响可以忽略,则:

$$\Delta \vec{\mathbf{v}}_{o} = -\frac{n_{p}m_{p}}{n_{o}m_{o}} \,\Delta \vec{v}_{p} \tag{1-7}$$

在这一简化结果中,太阳风质子与火星氧离子的能量传递过程被近似为类似 惯性碰撞中的动量交换,因此,这一过程称为"磁层动量传输"模型,最早由 Perez de Tejada (1987)、Lundin (2007)、Dubinin (2007)等人在分析火星和金 星的磁层离子加速过程中提出。



图 1.11 "质量加载"过程示意图(Lundin et al., 2007)

如图 1.11 所示,"质量加载"过程对火星重离子逃逸通量的具体公式为 (Lundin et al., 2007):

$$\Phi_{M} = \frac{V_{SW} \cdot m_{SW}}{V_{M} \cdot m_{M}} \left( \Phi_{SW} - \frac{V_{i,SW}}{V_{SW}} \Phi_{i,SW} \right) \cdot \frac{\delta_{SW}}{\delta_{M}}$$
(1-8)

其中, A 代表逃逸截面面积。根据火星离子的逃逸速度约为5公里每秒,太阳风速度平均为400公里每秒,平均密度为 $5 \times 10^6$ 立方米,则太阳风穿越截面面积的总通量约为 $1.6-6.5 \times 10^{14}$  (m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>);约为 $1.6-6.5 \times 10^{14}$  (m<sup>2</sup>),据此估算离子损失每秒约为0.53-2.2千克,与Lundin等人1989年的观测结果吻合。



图 1.12 MAVEN 观测离子受力情况分布图(Halekas et al., 2017)

但是,这一假设仅考虑了-**v**×**B**电场对离子的加速作用,忽略了**J**×**B**和热 压梯度力对离子的影响,对于计算火星总逃逸率而言,是不完备的。如图 1.12 所示,MAVEN 数据显示,在太阳风-火星大气相互作用过程中,-**v**×**B**电场对离 子的加速作用远高于热压梯度和**J**×**B**,因此,动量传输模型可以近似估算无内 禀磁场天体的全球离子逃逸率。

#### 1.3.2.3 电离层逃逸

火星大气稀薄,太阳风磁场可以渗透至向阳面电离层。观测结果显示,在火 星向阳面,离子从电离层直接逃逸,其中一种典型过程为"极风"(Polar Wind) 现象。Polar Wind 现象指在火星等无内禀磁场行星上,电离层重离子在行星引力 作用下比电子更难沿磁力线上行,因此,运动较快的电子会在磁场方向产生一个 热压梯度,导致极化电场(ambipolar electric field)产生,如图 1.13 所示(e.g., Collinson et al., 2018)。其中,电子的上行通道既可以是火星电离层顶处悬挂的行 星际磁场,也可以是开放性磁力线(Xu et al., 2018)。





其中,极化电场的强度可以表示为:

$$\mathbf{E}_{//} \approx -\frac{\nabla P_e}{en_e} \tag{1-10}$$

这一现象在火星上最早由 Frahm (2006)通过 Mars Express 数据在火星夜侧 区域观测到光电子 (Photoelectron)现象时提出。光电子是火星向阳面大气二氧 化碳分子或者氧原子吸收 304 Å 氦 II 谱线释放的能量约为 23 – 28 eV 的电子。光 13

电子只能在火星向阳面产生,其在电子能谱上的特征——光电子峰是火星电离层 外边界(PEB, Photoelectron Boundary)的判断依据之一。如前文所述,光电子 沿行星际磁力线运动至火星夜侧,暗示了 Polar Wind 电场的存在(Dubinin et al., 2011)。MAVEN 观测结果显示这一电场的分布范围位于火星向阳面 180 公里至 300 公里处,能够使火星重离子加速上行进入太阳风。Frahm(2006)估算电子 逃逸通量为 3 × 10<sup>23</sup> (s<sup>-1</sup>),假设等离子体保持准中性,则离子逃逸速率与此大 致相当。

另外,火星电离层在火星自转、纬向输运(Zonal transport)和行星际磁场 渗透的共同作用下,一部分电离层离子运动至火星夜侧,从而逃逸。观测上表现 为持续存在低能离子的"跨晨昏线流"(Trans-terminator ion flow)。Mars Express 于 2007 年 11 月 19 日至 12 月 3 日共观测到 7 次上述"跨晨昏线流"现象,如图 1.14 所示(Fraenz et al., 2010)。据估算,这些低能离子的"跨晨昏线流"的平均 速度约为 5 (km s<sup>-1</sup>),平均通量为 0.8 × 10<sup>9</sup> (cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)。MHD 模型(Ma et al., 2004) 和电离层离子的晨昏输运模型(Cui et al., 2015)均显示,在这些低能离子中, 逃逸的离子和输运至夜侧的离子比例约为 1:1,因此,根据观测计算出的电离层 低能离子的逃逸通量约为 1.6 × 10<sup>25</sup> (s<sup>-1</sup>)。



图 1.14 低能离子"跨晨昏线流" (Fraenz et al., 2010)

#### 1.3.2.4 磁尾电流片

排除剩余磁场的影响,磁尾电流片中的尾向离子流可以大体上分为两种:

(1) 由 J×B 的磁场压力和磁场张力驱动的尾向离子流;

(2) 由磁重联过程产生的高速双向离子流。

其中,由于火星感应磁层同样受到行星际磁场方向的调制, $J \times B$ 的能量来 源依旧为太阳风流的部分动能,通过压缩磁层使磁压升高,进一步加热和加速磁 层内部的离子。因此,磁尾电流片中的尾向离子流通量与太阳风参数存在非常强 的正相关性,如图 1.15 所示(Harada et al., 2015)。Mars Express 观测结果显示, 磁尾电流片中的离子逃逸通量平均值为  $2 \times 10^6$  (cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>),最大值可达  $5 \times 10^7$ (cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)(Barabash et al., 2015)。





事实上,由于火星剩余磁场的存在,火星磁尾电流片的结构比理想情况更为 复杂,如图 1.16 所示,与金星磁尾电流片对比可见,火星磁尾电流片不仅从结 构上变得更加复杂,在统计结果中也发生了"扭曲"。与此同时,火星磁尾磁场 重联发生率与太阳风驱动源的关系并不明显,其中,Harada et al.,(2017)对 MAVEN 探测器 776 次电流片穿越事件中的 34 次事件进行研究,发现重联发生 15



率与太阳风动压、阿尔芬马赫数等一系列外部驱动源没有明显的相关性。

图 1.16 金星、火星磁尾电流片对比图 (Xu et al, 2020)

目前,关于火星磁尾电流片与火星剩余磁场的相关工作还在进行,剩余磁场 对火星磁尾重离子通量的具体影响也尚不明确,相关观测和理论依据仍需进一步 探索和讨论。

#### 1.3.2.5 剩余磁场引发的逃逸

火星剩余磁场可以导致离子发生局部逃逸,这是剩余磁场对离子逃逸过程影响之一。剩余磁场的空间分布形态和探测历史将在本章 1.4 部分中进行简要介绍, 这里仅就磁场重联和极光 cusp 区域的爆发性离子流引起的离子逃逸进行简要介绍。其中,这些现象由剩余磁场结构与外界行星际磁场满足相应条件时触发,暂 无持续性发生的观测证据。



图 1.17 剩余磁场重联引发的离子逃逸示意图 (Brain et al., 2010)

由于火星大气较为稀薄,剩余磁场影响的高度范围在向阳面可以直接延伸至 火星磁鞘,当剩余磁场的闭合磁力线与太阳风中的行星际磁场方向相反时,有可 能触发磁场重联(Harada et al., 2018),这一过程可能导致剩余磁场束缚的离子被 太阳风捕获、逃逸。如图 1.17 所示,当剩余磁场伴随火星旋转至晨昏线附近时, 太阳风与剩余磁场相互作用,同样可以触发重联(Brain et al., 2010)。由于剩余 磁场为火星电离层离子上行提供了通道,图 1.17 所示的磁重联过程可以使剩余 磁场内的重离子整体逃逸,Brain 对磁通量绳(fluxrope)内的重离子通量进行了 估算,结果显示此次事件造成的逃逸通量为 3.6×10<sup>25</sup> - 7.3×10<sup>26</sup>,平均损失 率为 7.9×10<sup>22</sup> - 1.6×10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>)。



图 1.18 剩余磁场极隙区离子加速机制 (Lundin et al., 2006)

此外,剩余磁场的开放性磁力线可以形成类似地球极隙区的磁场结构,从而 使电离层离子加速上行。火星极光现象由 Mars Express 飞越火星南半球剩余磁场 区域时得到首次观测, Mars Express 搭载的光谱仪在一氧化氮波段的 5 个空间区 间皆探测到了明显的极光峰(Bertaux et al., 2005)。如图 1.18 所示,剩余磁场的 cusp 结构可以对离子进行加速。Mars Express 的观测结果显示(图 1.19),当卫 星进入火星南半球剩余磁场上空的电离层区域时,电子峰出现了反转的'V'型 结构,伴随电子高速入射流。这些特征表明,存在一个场向电场,使重离子沿磁 场方向加速。根据估算,此通道造成的离子逃逸通量可达 10<sup>23</sup> (s<sup>-1</sup>)量级(Lundin et al., 2006)。



图 1.19 剩余磁场极隙区结构观测结果(Lundin et al., 2006)

#### 1.3.2.6 空间天气事件

太阳风和火星高层大气之间的能量传递过程是离子逃逸的主要驱动源。行星际磁场方向控制火星感应磁层的形态;太阳风动压控制感应磁层的膨胀和收缩。 当驱动源增强时,太阳风与火星重离子之间能量传输通量迅速上升,在观测结果 上表现为逃逸通量的增强。其中,日冕物质抛射事件(CME)和太阳共转相互 作用区(CIR)是促使火星离子逃逸速率增加的主要因素之一。



图 1.20 CME 事件对火星离子逃逸的影响 (Ramstad et al., 2017)

Mars Express 早期观测结果显示, CME 事件可以使重离子的出流通量提高 一个量级(Futaana et al., 2007)。Mars Express 于 2011 年观测到一次日冕物质抛 射事件,观测结果显示(图 1.20), ICME 中质子密度为 39(cm<sup>-3</sup>),速度为 730 (km s<sup>-1</sup>)。这次事件使火星感应磁层剧烈收缩,磁层横截面积减小了约四分之一 (Ramstad et al., 2017)。

2015年3月8日,MAVEN探测器对另一次ICME事件的观测结果显示,ICME 扫过火星期间,行星际磁场强度由5(nT)上升至最高20(nT);质子密度由1.8 (cm<sup>-3</sup>)上升至11(cm<sup>-3</sup>); alpha 离子密度由0.1(cm<sup>-3</sup>)上升至0.6(cm<sup>-3</sup>); 太阳风流速由505(km s<sup>-1</sup>)上升至820(km s<sup>-1</sup>);太阳风动压增强了约20倍, 从0.9纳帕(nPa)上升至20纳帕。期间,磁层中的离子温度迅速增加,pickup 离子逃逸通量显著增强。MHD模型估算结果显示这次ICME事件下离子的全球 逃逸通量可达~10<sup>25</sup>(s<sup>-1</sup>),是平均火星离子全球逃逸率的7倍。



图 1.21 CIR 及其对火星离子逃逸的影响(左: Pi zzo et al., 1978)

由于太阳自转以及不同日面经度上日冕膨胀速度的差异,太阳风高速流超越低速流引发 CIR 事件的产生。CIR 对火星空间环境的主要影响是太阳风动压的显著提升以及行星际磁场方向上引起的扰动,一次 CIR 事件掠过火星大约需要 36 小时,在当前观测到的太阳活动周期内,一个太阳自转周期(约27天)中平均约遭遇到 2.4 次 CIR 事件。由此可见,CIR 事件导致火星离子逃逸速率的增强约占据所有观测数据的 15% (Edberg et al., 2010)。如图 1.22 所示,Mars Express 观测结果显示,2008 年 1 月 7 日,当 CIR 于图中 P2 时刻掠过火星时,电子和离子的能量均出现显著增强。这次 CIR 事件,太阳风动压增强了约 2 - 3 纳帕,氧

离子的出流通量达到  $1 - 7 \times 10^7$  (cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), 比 CIR 事件扫过火星前的离子平均出流通量高出一个量级 (Wei et al., 2012)。





Edberg et al. (2010) 对太阳活动性较低的 2007 至 2008 年共计 41 次 CME 和 CIR 事件进行了统计分析,结果显示这些事件使离子逃逸通量增加了约 2.5 倍, 占观测时间内总逃逸通量的三分之一。Edberg et al. (2011) 用类似的方法对金星 逃逸同样进行了分析,结果显示在太阳活动性较强时,这些空间天气事件可以使 离子逃逸速率增强 5 到 7 倍。考虑到火星较地球更弱的引力和微薄的大气, CME 和 CIR 在太阳活动性较强时期对火星离子逃逸速率的影响仍需要等待未来的卫 星观测数据进行进一步研究和探讨。

#### 1.3.3 离子逃逸率

火星离子逃逸的观测历史可以追溯至 1988 年发射的"火卫一2号",该卫星 首次测量到了火星磁层边界的尾向离子流,随后,探测卫星在探测火卫一的过程 中失联。20世纪 90 年代后,成功抵达火星并搭载了离子测量仪器的探测计划仅 为两次,分别是 2003 年 Mars Express 和 2014 年 MAVEN 探测器。本文将根据以 上两颗卫星的观测结果,对火星全球离子逃逸率进行简单介绍。


South Heavy ion flux, integrated + fitted,  $\log_{10}$  part m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

图 1.23 Mars Express 火星重离子观测结果 (Nilsson et al., 2010)

Mars Express 和 MAVEN 探测器都是单颗卫星就位探测计划,因此,对火星 全球离子逃逸率的测量需要统计分析多年观测数据的累积结果。其主要计算方法 为:假设火星磁层旋转对称,则重离子的观测数据可以投影到二维平面;再根据 截面内尾向离子通量的大小对全球逃逸进行估算,如图 1.23 所示(Nilsson et al., 2010)。目前观测到的离子逃逸速率和各个通道造成的逃逸通量如图 1.24 所示, 其中,Barabash(2007)根据 Mars Express 2004 至 2006 年的观测结果,对火星 磁尾 30-30000 电子伏特的离子流进行统计,结果显示氧离子逃逸速率为: 1.6× 10<sup>23</sup> (s<sup>-1</sup>),氧分子离子逃逸速率为 1.5×10<sup>23</sup> (s<sup>-1</sup>),二氧化碳分子离子的逃逸速 率为 8×10<sup>22</sup> (s<sup>-1</sup>),假设逃逸了 35 亿年,约造成了 0.2 – 4 豪巴的大气和几厘米 厚的全球性液态海洋通过逃逸方式损失。

Ramstad (2018) 根据 Mars Express 十年观测结果对离子逃逸率进行了重新 估算,结果约为 1.3× 10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>),与 Nilsson (2011) 的观测结果相近。Brain (2015) 根据 MAVEN 前 4 个月的观测结果对能量大于 25 电子伏特的重离子尾向流进行 统计,结果显示其逃逸通量为 3×10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>),约对应 0.1 米的全球海洋和 4 豪巴 的大气。由于单颗飞船的探测条件有限,火星全球性离子逃逸在不同太阳活动性、 不同仪器下的观测结果难免存在差异,总体而言,火星离子逃逸率的量级约为~ 10<sup>23</sup> – 10<sup>25</sup> (s<sup>-1</sup>)。



图 1.24 火星离子逃逸率观测结果汇总(Dubinin et al., 2011)

### 1.4 火星剩余磁场

距离人类首次发现火星表面存在剩余磁场已有近 20 年的历史,这 20 年间, 仅 MGS 和 MAVEN 探测器两颗卫星携带了磁强计,能够对剩余磁场进行测量。 因此,当前对火星剩余磁场的研究仍在继续。同时,由于剩余磁场固定在火星表 面,与火星一起进行为期 24 小时 37 分钟的自转,这一动态变化过程使研究剩余 磁场与太阳风相互作用变得更加困难。本小节内容将结合剩余磁场的探测历史, 对磁场观测结果和本文使用的剩余模型进行简单介绍,同时将前人对剩余磁场和 离子逃逸关系的研究结果进行简要小结。

# 1.4.1 探测历史

20世纪90年代以前美国和前苏联的火星探测器,如"水手4号","火星" 系列探测器均搭载了磁强计,在穿越火星弓激波时发现火星并不具有强内禀磁 场。1998年,MGS在火星北半球距离火星表面约100公里的高度处探测到局地 磁场强度约为400纳特(图1.25左)且南北不对称的磁场,从而首次确认火星 存在剩余磁场但不具有较强的全球性内禀磁场(Acuña et al., 1998)。1999年,根

据 MGS 观测数据结果显示,火星剩余磁场主要分布在火星地理南半球,其磁场 强度最强的区域集中在西经 130 度至 230 度之间,即图 1.25 右图中所示的萨瑞 南高地(Sirenum Terra)区域(Acuña et al., 1999)。目前对火星剩余磁场的成因 尚不清楚,一种可能性解释为火星地表岩石冷却后残余的地磁场热剩磁,可能记 录了火星内禀磁场消失前的磁场信息(Arkani-Hamed, 2003),因此剩余磁场也被 称为火星"壳磁场"(Crustal Magnetic field)。



#### 图 1.25 火星剩余磁场观测结果 (Acuña et al., 1999)

1999年, MGS 探测器轨道降低至 400 公里的高度, 对剩余磁场进行了详细 测量(Connerney et al., 2005)。其分布结果如图 1.26 所示, 图中颜色表示单位经 纬度范围内磁场径向分量扣除平均值后的残差。其中, 在剩余磁场强度最高的东 经 180 度区域, 磁场信号呈现正负相间的条带状分布, 其东西延伸长度约为 2000 公里, 其磁场强度最高可达 12000 纳特, 是火星剩余磁场的主要特征。

另外,火星古火山活动强烈的区域如本文 1.1 部分提到的南半球萨希思大火 山省(Tharsis Montes);巨型撞击盆地,如图中位于南半球的海拉斯盆地(Hellas); 或者大断层区域,如图中赤道附近的水手大峡谷(Valles Marineris)均未观测到 强剩余磁场。因此,火星剩余磁场和火星内部发动机、火星地质构造活动、火星 古气候演化之间的关系等一系列重要问题尚未解决,仍需人类不断开展火星计划 进行探索。



图 1.26 400 公里高度处火星剩余磁场分布图 (Connerney et al., 2005)

### 1.4.2 磁场模型

目前,对火星全球性剩余磁场进行建模的方法大概可以分为两类:一类是等效偶极子(Equivalent source dipole)方法,另一类是使用球谐函数对观测数据进行拟合的方法。等效偶极子方法假设火星表面存在很多磁偶极子,400公里高度处观测到的剩余磁场是这些偶极子场的叠加效果。第一个使用等效偶极子方法对火星剩余磁场进行建模的是 Purucker (2000),然而,这种方法得到的模拟结果与观测结果吻合度仍待提高。



图 1.27 400 公里处火星剩余磁场模型(Morschhauser, 2016)

另外一种方法是使用球谐函数对观测数据进行拟合。球谐函数是球坐标系下 用来求解拉普拉斯方程的数学方法,而拉普拉斯方程可以描述磁势(scalar magnetic potential)在无源条件下的分布状况,因此,能够使用该方法对剩余磁 场观测结果进行拟合。球谐函数方法得到的磁场模型结果与观测结果吻合程度较 高,因此,本文采用由球谐函数方法构建的磁场模型研究剩余磁场对离子逃逸的 影响(Cain et al., 2003)。

### 1.4.3 剩余磁场对离子逃逸的影响

本文1.3.2.5 中简要介绍了火星剩余磁场在特殊情况下对重离子的加速过程, 其中磁重联过程需要行星际磁场方向与火星剩余磁场的反向、极隙区加速需要太 阳风电子沿剩余磁场注入且磁场形成极隙区结构等等。本小节从更一般的情况讨 论太阳风与火星磁层相互作用过程中剩余磁场对离子逃逸的影响,从而对剩余磁 场在太阳风能量输入过程中对全球性离子逃逸速率的影响进行整体评估。





Crider (2002) 统计 MGS 卫星对火星磁层边界区位置的观测结果中首次发现,火星南半球磁层边界高度要明显高于北半球,据此推测剩余磁场可以影响太阳风与火星磁层间的相互作用,并对火星离子产生显著的局地效应(图 1.28

(左))。Edberg(2009)根据 MGS 和 Mars Express 的观测数据对剩余磁场与火 星磁层、弓激波位置关系进行研究,结果如图 1.28 右图所示,火星磁层边界位 置在南半球显著高于北半球,且与剩余磁场分布情况基本吻合,从而证实了剩余 磁场可以整体性抬升火星南半球磁层高度。MAVEN 数据同样显示,在剩余磁场 25 影响下火星南半球磁层边界位置比北半球更高(e.g., Matsunaga et al., 2017)。

火星磁层是火星重离子加速逃逸的主要区域,剩余磁场对火星离子逃逸的影响也应该有所体现。Mars Express 早期离子探测数据显示,能量低于 200 电子伏特的氧离子通量在火星南、北半球呈现明显的不对称性分布,从火星南半球区域观测到的尾向流低于北半球,因此判断剩余磁场对重离子存在保护作用(Lundin et al., 2011)。这一结论得到了 Mars Express 后续观测的支持, Nilsson (2011)统计结果显示,在低太阳活动性下, 2007 年 5 月至 2011 年 5 月共 4 年的观测数据显示,火星磁层中观测到的尾向离子逃逸通量在南半球以及火星晨侧达到最小,约为 0.4±0.1×10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>);在火星昏侧和北半球观测的逃逸通量为 0.6±0.1×10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>)。

上述结论在后续的观测结果中得到了部分肯定,Ramstad (2011)根据 8 年 (2007-2015)Mars Express 观测结果,追踪剩余磁场伴随火星自转时磁层中尾向 离子流通量的变化。结果显示,当剩余磁场旋转至火星晨侧或昏侧(太阳天顶角 60 至 80 度)时,离子逃逸速率最高,为4.2±1.2×10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>);当剩余磁场旋转 至火星正午时(太阳天顶角 28 至 70 度),离子逃逸速率最低,为1.7±0.6×10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>)。推测剩余磁场对离子逃逸存在阻碍作用。但是,其结果同样显示,火星 南北半球观测到的离子逃逸通量差异很小,且不随火星自转发生变化。

以上结果显示,虽然剩余磁场能够影响太阳风-火星电离层之间的相互作用 过程,但是其对太阳风能量的调制作用似乎并不明显。Fang(2015)通过 MHD 模型模拟火星自转一个周期内磁层中离子逃逸通量的变化,结果显示剩余磁场可 以有效阻碍太阳风动压对火星电离层的剥蚀,因此某种程度上减少了离子逃逸通 量;但是这一现象受制于自转效应,当剩余磁场旋转至火星晨昏线附近时,使火 星磁层的横截面积增加,逃逸通量增强。因此,剩余磁场对火星全球离子逃逸的 作用较为复杂、尚不明确,仍需进一步研究。

#### 1.5 本文工作的主要内容

火星剩余磁场在 20 世纪 90 年代中首次发现,时至今日,针对火星空间环境 开展的探测任务仅有三次: MGS, Mars Express 和 MAVEM。 其中: MGS 没有携带离子探测仪器,无法对离子进行测量;

Mars Express 没有携带磁强计,无法对磁场进行直接测量。

兼具磁场信息和离子探测仪器的探测任务仅有 MAVEN 计划,同时,由于 Mars Express 对离子测量的时间分辨率为 192 秒,相较于太阳风扫过火星磁层仅 需不到 20 秒的时间尺度而言过于漫长,因此,在 MAVEN 探测器返回观测数据 之前,关于火星剩余磁场与重离子逃逸过程的认识非常有限。MAVEN 计划为研 究火星局地剩余磁场和离子逃逸过程提供了非常珍贵的观测数据。其中,MAVEN 于 2014 年 10 月抵达火星,观测数据于 2015 年陆续公开,作者就读博士期间的 主要工作,主要围绕处理和分析 MAVEN 数据展开。

本文主要分为三个部分:

第一部分为第二章节,主要介绍 Mars Express 和 MAVEN 上搭载的探测仪器 以及离子数据的分析和处理。

第二部分为第三章节,从能量传输角度,考察外部驱动源对离子逃逸的影响 以及探究剩余磁场在能量传输过程中的作用。其中,太阳风是火星离子逃逸的主 要驱动源;太阳 XUV 辐射是离子逃逸源区——火星电离层的主要影响因素。第 三章节的前两个部分将对上述两个驱动源和火星重离子逃逸关系依次研究,随后 分析火星剩余磁场与离子逃逸之间的关系。在第三章节的最后,将对首次观测证 实的结果——火星剩余磁场对太阳风能量传递的阻碍作用进行分析和讨论,其结 果有助于我们进一步理解和估算剩余磁场对火星全球离子逃逸速率的影响。

第三部分为第四章节,这一章将更加具体的描述火星剩余磁场对重离子(本 文仅涉及氧离子和氧分子离子)的影响。其中,将依次介绍火星重离子在剩余磁 场作用下呈现出的二分性:即南-北不对称性和晨-昏不对称性。结果首次展示了 剩余磁场对火星近地空间环境产生的重要影响以及对低能重离子的束缚作用,有 助于我们进一步加深剩余磁场与离子逃逸过程之间的认识。

第四部分为第五章节,将对前几章的工作内容进行简要小结,并对后续工作 的研究思路进行展望。

# 第2章 观测数据

20世纪90年代以前,携带离子探测仪的火星探测计划仅为有限的几次环绕, 对火星空间环境中的离子分布情况、离子基本物理参数的了解都非常有限。因此, Mars Express 和 MAVEN 探测器上搭载的离子探测仪和其他等离子体测量仪器为 研究离子和太阳风驱动的离子逃逸过程提供了重要工具,也对详细认识火星空间 环境产生了极大帮助。本章将对 Mars Express 和 MAVEN 两颗卫星的基本情况进 行简要介绍;随后对两颗卫星搭载的离子探测仪器——静电分析仪进行一般性概 述;其次简要介绍一下火星空间环境常用的坐标系以及研究剩余磁场使用的火星 地理坐标系;最后,对 Mars Express 和 MAVEN 探测到的火星离子物理参数,如 密度、速度的分布情况进行简单展示。

# 2.1 卫星探测任务

迄今为止,人类已向火星发射探测器开展就位探测 40 余次,成功抵达火星 的卫星计划不足半数,其中完全达成预期科学目标的探测非常有限。火星就位探 测的困难性以及 20 世纪 90 年代以前探测技术的限制导致火星重离子探测非常困 难,观测结果也十分有限。随着探测技术的不断成熟,在 21 世纪的前 20 年,火 星重离子探测取得了显著进展。本部分将对 Mars Express 和 MAVEN 两颗卫星进 行简要介绍,包括飞船的轨道信息、等离子体探测仪器,特别是离子探测仪器测 量原理等内容,为合理分析离子数据提供背景信息。

# 2.1.1 Mars Express

Mars Express 是欧洲航天局开展的火星探测计划,卫星发射于 2003 年 6 月 2 日,于同年 12 月 25 日关闭主引擎正式环绕火星飞行。截至本文写作时间,Mars Express 仍然在火星轨道开展科学探测任务,累计工作时长接近 17 年。Mars Express 轨道近火点高度为 298 公里、远火点高度为 10107 公里,绕火一周需约 7.5 个小时,即每天环绕火星约 3 圈半,由于火星的自转影响,Mars Express 近 火点位置在火星表面不断变化,其轨道覆盖如次数图 2.1 (左)和图 2.2 (左)



图 2.1 Mars Express 和 MAVEN 在 MSO 坐标系下数据覆盖次数

图 2.1 为卫星在火星-太阳坐标系下覆盖次数,图 2.2 为卫星在火星地理坐标系下覆盖次数。图 2.1 中颜色代表覆盖次数,x坐标为火星-太阳连线方向、其正方向指向太阳;y坐标为旋转对称坐标,正方向指向火星轨道面正北;单位是火星半径。图中红线代表拟合的火星弓激波位置,紫线为拟合的火星感应磁层边界位置。图 2.2 中颜色代表覆盖次数,横坐标为火星地理经度;纵坐标为火星地理纬度。图中黑色等势线为火星剩余磁场模型的等值线,指示 400 公里高度处剩余磁场的分布情况。





Mars Express 有关空间探测的仪器包括:火星表层次表层和电离层雷达 (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding, MARSIS)和空 间等离子体和高能原子分析仪(ASPERA-3)。其中,ASPERA 仪器组合包括电 子质谱仪(Electron Spectrometer, ELS),离子质量分析仪(IMA),中性粒子分 析仪 (Neutral Particle Detector, NPD) 和中性粒子成像仪 (Neutral Particle Imager, NPI)。本文中使用的离子数据由 IMA 观测得到,时间分辨率为 192 秒,能量测量范围为 10 电子伏特至 30000 电子伏特,仪器视场角度为 90°×360°,角度分辨率为 4.5°×22.5° (Barabash et al., 2006)。

2.1.2 MAVEN

MAVEN 探测器是美国国家航空航天局开展的火星探测任务,卫星发射于2013年11月18日,并于次年9月22日抵达火星轨道,截至本文写作时间,MAVEN 探测器环绕火星开展科学探测工作已累计近6年。MAVEN 探测器轨道近火点高度小于150公里,远火点高度约为6200公里,绕火星一周需要约4.5个小时,即每天环绕火星约6至7周(Jakosky et al., 2015)。与Mars Express 类似,MAVEN 探测器的近火点位置在火星表面不断变化,其轨道覆盖次数如图2.1(右)和图2.2(右)所示。



图 2.3 MAVEN 探测仪器工作计划示意图 (Jakosky et al., 2015)

MAVEN 探测器搭载的空间探测仪器及其在火星不同空间环境中工作分配 计划如图 2.3 所示,包括 Langmuir 探针(LPW)、磁强计(MAG)、太阳风质 子分析仪(SWIA)、太阳风电子分析仪(SWEA)、热和超热离子成分分析仪 (STATIC)、中性和离子质谱仪(Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer, NGIMS)、 太阳高能粒子分析仪(Solar Energetic Particle, SEP)。其中,NGIMS 仅能对离子 30 密度进行测量,且仅在飞船接近近火点期间开启,因此本文不涉及相关工作。本 文中使用的仪器包括 STATIC、SWEA、SWIA、MAG 和 LPW,其中 SWIA 和 STATIC 以及 Mars Express 上 IMA 为静电分析仪。STATIC 时间分辨率最短可为 4 秒,能量测量范围为 0.1 电子伏特至 30000 电子伏特,质量分辨率为 0.1 至 100 个原子质量单位 (amu),仪器视场角度为 90°× 360°,角度分辨率为 4.5°× 22.5° (McFadden et al., 2015)。

# 2.2 静电分析仪

静电分析仪是空间探测中常用的带电粒子能谱测量分析仪器。其中, Mars Express 和 MAVEN 使用的是球帽型 (Top Hat)静电分析仪,其测量原理如图 2.4 所示。球帽型静电分析仪的偏转板 (Deflector)上附带负高压使离子运动轨迹发 生偏转 (如图 2.4 中绿色轨迹所示)进入分析腔。根据偏转板上电压的不同,使 仪器达到±45°的纵向视场 (Field of View, FOV);而球帽本身提供了 360°的视场,因此其总空间分辨率为 90°×360°。当带正电的离子进入分析腔中后,在静电场的作用下,不同能量、质量和电荷的粒子将沿着不同的轨道运动,其具体关系如下:



图 2.4 球帽型静电分析仪器测量原理示意图 (Barabash et al., 2007)

假设图 2.4 中蓝线所示的金属板曲率半径为 *R*、相距距离为 *d*、两块金属板间的电压为 *U*,则板内电场强度为:

$$E = \frac{U}{d}$$
(2-1)

当粒子继续按照图 2.4 中绿线所示的轨迹沿半径 R 到达加速出口 (Acceleration)时,电荷量为 q 的粒子满足:

$$\frac{\mathrm{mv}^2}{R} = \frac{\mathrm{qU}}{\mathrm{d}} \tag{2-2}$$

粒子的动能用 E 来表示,则 2-2 式可变换为:

$$\frac{\mathrm{E}}{q} = \frac{\mathrm{UR}}{2d} \tag{2-3}$$

粒子通过加速出口后,加速板上的电压会对粒子进行二次加速,质量大的离子(如氧离子)运动轨迹近似直线,落在感受器(Detector)右侧,而质量小的离子如氢离子则偏转轨迹较大落在感受器左侧,如图 2.4 中绿色轨迹所示。根据离子落在感受器上的位置可以反推离子通过加速板后的飞行时间(Time of Flight),从而对离子质量进行进一步确认。其中 Mars Express 上 IMA 可以分辨氢离子、氦离子、alpha离子、氧离子、氧分子离子等;MAVEN 上搭载的 STATIC除此之外可以分析更重的二氧化碳分子离子。然而,在实际探测过程中,测量环境更加复杂,需要对数据进行谨慎的分析和处理。本文仅对火星空间环境中的主要离子成分:氢离子、氧离子、氧分子离子进行分析和讨论。

#### 2.3 坐标系

除了空间探测仪器中各自独有的仪器坐标系外,火星空间环境主要使用以下 坐标系:火星-太阳-轨道面坐标系(Mars-centered Solar Orbital, MSO);火星-太 阳风电场坐标系(Mars-centered Solar wind Electric field, MSE)和火星地理坐标 系(Mars Geographical coordinate, GEO)。其中,火星地理坐标系也被国际天文 协会规定为IAU\_MARS坐标系,二者等同。以下小结将对三种坐标系的定义进 行简单介绍,以及概括三种坐标系对应的研究内容。

# 2.3.1 火星-太阳-轨道面坐标系

火星-太阳-轨道面坐标系是火星系统最常用的坐标系之一,该坐标系可以用 来描述太阳风流与火星高层大气之间的相互作用。前文中出现的图 1.3、1.11、 1.20、1.22、1.23、1.28、2.1、2.3即在此坐标系下绘制。MSO 坐标系下的 x 轴 正方向从火星质心指向太阳,一般而言与太阳风流方向相反; z 轴正方向与火星 公转轨道面垂直指北; y 轴方向可根据右手系准则确定,根据火星的自转方向可 以判断,一般指向火星昏侧方向。MSO 坐标系与火星公转轨道面绑定,因此便 于对卫星进行定位,从而对卫星上搭载的仪器坐标系进行相应转换,所以大部分 火星计划仪器测量的数据坐标系使用 MSO 坐标系。

# 2.3.2 火星-太阳风电场坐标系

火星-太阳风电场坐标系主要用来研究太阳风电场与火星离子、火星感应磁 层之间的关系。其 x 轴正方向与太阳风流方向相反,即-v 方向;其 y 轴正方向为 行星际磁场的方向,即 B 方向;则 z 轴正方向即可以由-v×B 来确定。前文中出 现的图 1.4、1.6~1.10、1.12、1.15~1.16 即在此坐标系下绘制。MSE 坐标系可 以分析太阳运动电场对 pickup 离子、磁层重离子的加速作用,也可以用来描述 磁尾电流片等结构。但是,由于 MSE 坐标系与太阳风流和行星际磁场方向直接 相关,因此在进行坐标系转换时需要根据卫星穿出弓激波后实际测量的太阳风参 数进行相应计算,所以在观察数据的应用中受限。另外,火星-太阳风相互作用 的模型模拟结果大多在此坐标系展示。



图 2.5 MSE 坐标系下氧离子和氧分子离子流量示意图

如图 2.5 所示, MAVEN STATIC 仪器观测的 MSE 坐标系下氧离子(左图) 和氧分子离子(右图)的平均通量分布图。颜色代表离子流量的大小,蓝色箭头 代表流量方向在 MSE 坐标系下 x-z 平面的投影,黑色实线代表火星的位置,红 色实线表示弓激波模型位置,紫色实线为感应磁层模型位置。可见在 z 轴正方向, 也就是-*v*×*B* 电场方向上,磁鞘区域观测到了大量被太阳风电场加速的重离子。

2.3.3 火星地理坐标系

火星地理坐标系是伴随火星自转的共自转坐标系,与火星地表上的固定点 (如剩余磁场)相对静止,又称为火星地理坐标系。其 x-y 平面位于火星赤道面, x 轴正方向从火星中心出发指向火星东经 0 度位置; y 轴正方向从火星中心指向 火星东经 90 度位置; z 轴与火星自转轴重合,正方向指向火星地理北极。这一 坐标系主要用于研究剩余磁场与火星空间环境的关系。

#### 2.4 离子物理参数

球帽型静电分析仪对单位时间内离子的计数率进行了统计,从而可以转换成 离子的能流通量,表现为离子的能谱图。根据观测到的能流通量,可以对离子的 密度、速度等物理参数进行计算。本小结根据实际观测结果,展示 Mars Express IMA 和 MAVEN STATIC 观测的氢离子、氧离子、氧分子离子在火星空间中的分 布。其中,观测结果仅用统计形式表现,使用这些物理参数进行的具体事件分析 将在本文第三章 3.3.1 部分进行展示。



2. 4. 1 Mars Express IMA

图 2.6 Mars Express MSO 坐标系下太阳风流分布图

Mars Express 为认识太阳风离子和火星重离子在空间环境中的分布取得了极 其重要的作用。图 2.6 根据 2004 年 2 月至 2016 年 9 月共 12 年的 Mars Express 观测数据统计了太阳风质子密度、速度和通量在 MSO 坐标系下的空间分布。其 中颜色分别代表物理量的大小,黑色实线为火星弓激波的平均位置,紫色实线为 火星感应磁层边界的平均位置。图 2.6 可见,火星空间环境 1.5 个日地平均距离 (AU)处太阳风质子平均密度约为 ~10 (cm<sup>-3</sup>)量级,太阳风平均速度约为 400 (km/s)。平均结果显示,太阳风在磁层边界区域被有效减速,在火星磁尾形成 了一个低速、低密度的空腔,很好的吻合了磁流体模拟对太阳风-火星磁层相互 作用的描述。另外,根据图 2.1 (左)所示,飞船在弓激波外 2 个火星半径处的 覆盖较少,因此观测结果出现差异,导致该区域数值存在异常。



图 2.7 Mars Express MSO 坐标系下重离子(> 50eV)分布图

图 2.7 中展示的是能量大于 50 电子伏特的火星重离子(质量数大于 4 个原子质量单位)空间分布,其图片格式和坐标系均与图 2.6 相同。图 2.7 可见,重离子在火星磁层内的平均密度约为~ 0.1 (cm<sup>-3</sup>)量级,平均速度低于 40 (km/s),平均通量约为~10<sup>10.5</sup> (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)量级。尽管图中显示火星磁鞘中重离子密度约为~0.03 (cm<sup>-3</sup>)量级,但是这一计数率已接近 IMA 对离子数密度的分辨下限,其可信度有限。综上,Mars Express 对磁鞘和弓激波区域的太阳风,磁层内的重离子探测结果比较可信,可以用于计算和研究磁层内部的重离子逃逸通量对太阳风参数变化的响应。

# 2.4.2 MAVEN STATIC

STATIC 的时间分辨率为4秒,因此其观测数据的空间覆盖次数大大提高, 另外,MAVEN 的轨道高度更低、环绕周期更短,因此,其离子数据的空间分辨

率优于 Mars Express。STATIC 对低能离子和氧分子离子进行了更好的测量,以下部分会对 STATIC 的统计观测结果进行依次展示。其中,图 2.8 至图 2.12 的图 片格式与图 2.6 相同。



图 2.8 MAVEN MSO 坐标系下太阳风质子分布图

如图 2.8 所示, MAVEN STATIC 对太阳风的观测结果与 Mars Express 基本一致。质子平均密度约为~10(cm<sup>-3</sup>)量级,太阳风平均速度约为400(km/s)。 太阳风在火星磁鞘(图 2.8 黑色与紫色线之间的区域)中被火星感应磁层阻挡, 在日下点附近形成了一个密度逐渐升高、速度逐渐降低的区域。其中,太阳风质 子密度(图 2.8 左)在火星磁尾区域呈现明显的南-北不对称分布。在磁尾约-2 个火星半径的区域,北半球太阳风对磁层的压缩程度更为显著,显示了剩余磁场 在大尺度结构上对火星太阳风-磁层相互作用的影响。



图 2.9 MAVEN MSO 坐标系下氧离子(> 30eV)分布图

为了便于和 Mars Express 观测结果进行对比以及更好的排除飞船电势的影响,将 STATIC 对重离子的测量结果以 30 电子伏特为界,划分为两个部分。图 2.9 展示了能量高于 30 电子伏特(简称热离子部分)的氧离子观测数据。与图 2.7 Mars Express 的观测结果类似,热氧离子部分在火星磁层内部的平均密度约

为~0.3 (cm<sup>-3</sup>)量级,其平均速度低于 50 (km/s),平均通量约为 ~10<sup>10.5</sup> (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) 量级。其中,感应磁层以外热离子密度极低。图 2.9 (右)氧离子通量图所示, 在 x=0 位置处的磁鞘区域内,氧离子通量显著升高,为 ~10<sup>10</sup> (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)量级。 如图 2.5 (左),热氧离子在 MSE 坐标系下的观测结果显示,图 2.9 (右)展示的 是火星 pickup 氧离子通量在 MSO 坐标系下的分布。



图 2.10 MAVEN MSO 坐标系下氧分子离子(> 30eV)分布图

图 2.10 统计结果显示,火星热氧分子离子的分布与图 2.9 和图 2.7 的结果类 似。图中显示氧离子在火星磁层内部的平均密度约为~1(cm<sup>-3</sup>)量级,其平均速 度低于 30 (km/s),平均通量约为~10<sup>10.5</sup>(cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)量级。其中,需要指出,本 文中使用的离子密度由通量和速度获得,因此存在一定误差,图 2.10(左)氧分 子离子的密度比氧离子高出约 4 倍,这一结果的真实性仍需进一步确认。另外,这一现象也存在一种合理的可能性解释,即因为氧分子离子更重、逃逸能量更高,因此比氧离子更难发生逃逸,因此保留在磁层中的热氧分子离子更多。这一现象 也可由图 2.10(右) x=0 位置,磁鞘中的氧分子离子通量体现。根据本文 1.3.2.1 中对 pickup 离子的介绍和图 1.9 统计结果所示,pickup 氧分子离子迅速穿出 欠星磁鞘和弓激波,逃逸至行星际空间。



图 2.11 MAVEN MSO 坐标系下氧离子(< 30eV)分布图

STATIC 对低能氧离子也进行了有效测量,其中,一个重要原因是 MAVEN 上携带的 Langmuir 探针和 SWEA 对飞船电势进行了直接和间接的测量和估计, 因此可以更好地对低能离子进行观测。图 2.11 展示的是能量小于 30 电子伏特的 低能氧离子分布图。首先需要说明的是弓激波外和磁鞘中密度低于~ 0.01 (cm<sup>-3</sup>) 量级的氧离子,这些测量结果是由仪器效应导致的非真实数据,因此这里不做任 何分析,仅对密度~ 1 (cm<sup>-3</sup>)量级的低能离子进行讨论。图 2.11 低能氧离子在 火星磁层中的平均密度约为~ 1 (cm<sup>-3</sup>)量级,其平均速度低于 4 (km/s),平均 通量约为~10<sup>9.5</sup> (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)量级。

值得注意的是,在火星夜侧电离层区域,即x=-1,y=0.5处的火星北半球, 图 2.11(左)低能离子密度和图 2.11(右)低能离子通量均呈现了明显的高值区 域。而南半球的相应位置则没有类似分布,可能性解释是低能离子沿剩余磁场闭 合磁力线沉降或沿开放磁力线加速逃逸导致密度上呈现低值。对比图 2.9 热氧离 子的相应区域分布图可见,热氧离子在南半球并没有出现异常高值区域,否决了 图 2.11低能离子被加速的猜想。但是,关于北半球低能离子究竟是发生了逃逸 还是沉降至火星大气的直接观测证据,仍待进一步的分析和研究。



图 2.12 MAVEN MSO 坐标系下氧分子离子(< 30eV)分布图

图 2.12 对能量小于 30 电子伏特的低能氧分子离子分布进行了展示。和氧离子结果类似,弓激波外和磁鞘中密度低于~0.01 (cm<sup>-3</sup>)量级的测量结果并不可信。图 2.12 显示低能氧分子离子在火星磁层中的平均密度约为~10 (cm<sup>-3</sup>)量级, 其平均速度低于 3 (km/s),平均通量约为~10<sup>10.5</sup> (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)量级。其中,在火 星夜侧电离层的部分也同样存在一个低能氧离子的南-北不对称现象。

此外,由图 2.11 和图 2.12,低能离子在火星夜侧 x < 0 的光学阴影区存在一

个明显的边界。这一边界与之前探测任务中对火星夜侧电离层的电子数据的观测结果存在一定程度上的吻合。低能离子数据为进一步研究火星离子加速过程提供了重要观测结果,其具体工作仍有待开展。

总体而言,在行星磁层内, Mars Express 和 MAVEN 对重离子的测量数据都 比较可靠,而磁鞘和弓激波则可信性较低。本文接下来的部分,将主要对火星剩 余磁场和磁层内观测到的逃逸离子进行研究。

# 第3章 剩余磁场对离子逃逸通量的影响

火星就位探测非常困难,不仅失败率高达一半以上,卫星发射窗口也长达两年一次。这一特征导致人们对火星离子逃逸和火星剩余磁场的认识还处于初步阶段。本章内容首先从大尺度能量传输的角度,对太阳风动压、太阳 XUV 辐射等外部驱动源与离子逃逸关系进行研究,并进一步分析了火星剩余磁场对上述能量传输过程造成的影响。随后结合 MAVEN 探测器在低高度采集的离子数据,对火星剩余磁场产生的局地效应进行了统计研究,并提供了相应的可能性解释。在本章的最后,总结量化了剩余磁场对火星全球离子逃逸率和能量传输效率的影响。

# 3.1 Mars Express 与 MAVEN 数据

火星离子逃逸的主要过程在感应磁层内进行,感应磁层的形状和大小受太阳 风动压和行星际磁场的控制不断变化,因此,对离子逃逸通量的估计首先要建立 火星感应磁层的平均模型。

Mars Express 对离子观测的时间分辨率为 192 秒,采集一个观测点耗时约 3 分钟。这一时间尺度导致 Mars Express 对火星空间环境的覆盖次数较低,逃逸率数值误差也较高。但是其长达 12 年的观测数据为建立边界层模型和离子逃逸的长周期变化起到了非常重要的作用。MAVEN STATIC 火星氧离子、氧分子离子的时间分辨率为 4 秒,结合 MAVEN 更短的环绕周期,累计 4 年的重离子观测数据能够对磁层内部的离子逃逸通量进行较好的估计。

# 3.1.1 火星空间环境观测结果

图 3.1 所示是 Mars Express 于 2007 年 2 月 25 日一次卫星轨道的观测结果。 图中 BS(Bow Shock)代表弓激波; IMB(Induced Magnetosphere Boundary)代 表感应磁层边界; PEB 为光电子峰边界,是识别火星电离层边界的特征之一。图 3.1(上)是 ELS 测量的电子能谱图, 3.1(中)是平均后的 IMA 测量的离子能 谱图, 3.1(下)是 IMA 测量的离子能谱图。UT 时间 02:45 附近,飞船从火星 弓激波进入磁鞘,其中一个重要的特征是太阳风动能向热能的转化,因此,电子 能谱图上显示电子的能量从~10 电子伏特上升至 30~50 电子伏特。IMA 观测结 果同样显示,磁鞘中减速的太阳风也不再呈现离子束的状态。随后,在 03:15 左右飞船进入火星磁层,磁鞘的等离子体特征是物质成分从太阳风等离子体向行 星离子的转变,在电子能谱上的表现为太阳风 30~50 电子伏特热电子的消失, 类似结果可对比 03:50 至 03:55,飞船位于火星磁层内部的观测结果。飞船于 03:20 进入火星电离层并于 03:50 飞出,其标志特征为火星光电子的出现。光 电子是火星向阳面大气中的二氧化碳分子或者氧原子吸收 304 Å 氦 II 谱线释放 的,能量约为 23 – 28 eV 的电子。在 3.1 (上)电子能谱图中可以清晰的观察到 对应电子峰出现。之后,Mars Express 对称穿越火星磁层、磁鞘,并于 04:30 左右再次穿出弓激波进入太阳风。



图 3.1 Mars Express IMA/ELS 2007 年 2 月 5 日观测结果

图 3.2 所示是 MAVEN 探测器于 2015 年 1 月 8 日一次类似的穿越事件。图 中从 a~e 依次为 SWIA 观测的离子能谱图, SWEA 观测的电子能谱图, STATIC 观测的离子质量谱图和磁强计观测的磁场数据。其 中 SWIA 与 STATIC 观测结果的主要区别是 SWIA 为了更好的分辨太阳风成分, 其观测的能量最低阈值为大于 30 电子伏特的离子成分。而 STATIC 则如本文

2.1.2 中介绍的,对 0.1~30000 电子伏特的离子均有观测。与图 3.1 不同的是,图 3.2 中对磁层边界的识别依据为 MPB (Magnetic pileup boundary)即磁场堆积边界。这一边界的定义如图 3.2 (e)磁场数据所示,对应磁场强度的增强和磁场扰动的消失。



#### 图 3.2 MAVEN 2015 年 1 月 8 日观测结果

当 MAVEN 在太阳风中(22:00 之前),图 3.2(a, c和 d)中清晰的展示了~1000 电子伏特太阳风质子和能量为其一倍的太阳风 alpha 离子。另外图 e 中磁场测量结果显示此时行星际磁场约为~5 纳特量级。UT 22:00 左右,飞船穿入弓激波进入火星磁鞘,除了与 Mars Express 观测结果类似的电子能谱特征,另外,磁场特征表现为磁场强度的骤增。MAVEN 探测器于 22:30 进入火星磁层,22:40 进入火星电离层,值得一提的是,由于并没有观测到类似图 3.1 中的光电子峰,这里对电离层的判断主要是图 3.2 (c,d)中出现的电离层离子,其离子能量小于10 电子伏特,质量谱上可以清晰的观测到氧离子和氧分子离子的谱线。飞船于

23:30 左右飞出电离层进入火星磁层,期间观测到了磁层中被太阳风-v×B电场加速的氧离子和氧分子离子,如图3.2(a,c)所示。随后,飞船于23:35 左右进入磁鞘,图中观测到了磁鞘中的 pickup 离子,并于1月9日0时前后再次穿越弓激波进入太阳风。

火星磁层边界层在识别特征上存在两种定义,其中 MPB 侧重行星际磁力线的堆积效果,而 ICB (Ion Composition Boundary) 侧重磁层两侧离子成分的不同。 图 3.2 (d) STATIC 观测的质量谱中清晰的展示了两种定义的类似性:在 22:30 和 23:35 左右的两次磁层边界穿越事件中,太阳风质子和 alpha 离子的能流通 量的消失和火星氧离子、氧分子离子能流通量的增强,与图 3.2 (e) 中磁场波动 性减弱现象呈现非常好的对应关系。

3.1.2 火星边界层模型

根据 3.1.1 中所述的火星空间环境特征,对 Mars Express 和 MAVEN 探测器 火星弓激波和感应磁层边界的穿越事件进行拾取,即可根据圆锥曲线对两个边界 层形状进行拟合。拟合结果如图 3.3 (左)所示,在 MSO 坐标系下,红色实线 为拟合的弓激波模型,紫色实线为拟合的感应磁层模型,坐标轴单位为火星半径。 共使用 2004 年 2 月至 2016 年 9 月,共计 12 年的 Mars Expresss 弓激波穿越事件 事件 8500 余次 (紫色),感应磁层穿越事件 11000 余次 (蓝色); 2014 年 10 月 至 2016 年 5 月 MAVEN 弓激波穿越事件事件 2000 余次 (黄色),感应磁层穿越 事件 6600 余次 (橙色)。由图可见,Mars Express 观测到的边界层位置在火星南 -北半球上的分布较为平均,而 MAVEN 由于轨道效应,观测点主要集中分布于 南半球。

图 3.3(右)所示为太阳天顶角(Solar Zenith Angle)介于 0 至 60 度之间, 日下点附近 60 度内的感应磁层边界所在高度。横坐标为距离火星地表的高度, 单位为公里;纵坐标为观测点数量,蓝色柱线表示北半球感应磁场边界,红色柱 线为南半球。总体而言,12 年的 Mars Express 结果显示,在火星南、北半球观 测到的 MPB 数目大致相当,但是蓝色柱状图的数目点峰值在 600 公里左右,红 色柱状图的数目点峰值在 900 公里左右;意味着平均而言,火星南半球处的感应

磁层要比北半球高出约300公里。

正如本文 1.4.3 中介绍的,这一现象的主要原因是火星剩余磁场引起的电离 层膨胀,从而导致火星南半球磁层也向外凸起。据此判断,火星剩余磁场可能对 离子全球性逃逸通量产生影响,本文 3.3 小节将对火星剩余磁场对离子逃逸过程 的影响进行显著性评价。



图 3.3 火星边界层模型和 Mar Express 观测到的 MPB 分布

### 3.2 离子逃逸的外部驱动源

影响离子逃逸的外部因素主要包括:太阳风动压(Solar Wind Dynamic Pressure);太阳 XUV 辐射;行星际磁场方向等。太阳风动压控制磁层形状与大小,直接影响磁层中逃逸离子的横截面积;太阳 XUV 辐射控制中性大气的膨胀 高度以及电离层离子的电离率,即控制火星电离层的膨胀与收缩;行星际磁场方向影响火星感应磁层的强弱,但是统计意义上对离子逃逸影响较小。本小节将对上述调控因素对离子逃逸的影响依次进行分析,将在 3.3 小节讨论剩余磁场与离子逃逸的关系。

## 3.2.1 太阳风动压

通过计算 Mars Express 和 MAVEN 探测器穿出弓激波后 10~20 分钟内太阳 风平均密度、速度参数(如图 3.4 所示),作为当前轨道的太阳风动压参量。然 后对其进行分组,统计不同太阳风动压条件下火星磁层不同位置处的尾向逃逸通 量,并分析研究二者的对应关系。图 3.4 中横坐标是卫星在火星 1.5 个 AU 处观 测到的太阳风速度,纵坐标为太阳风密度,颜色代表观测次数。如图所示,Mars Express 12 年观测中对太阳风参数统计图与 MAVEN 2 年太阳风统计图存在一定 的相似特征,如太阳风的平均速度为~400 公里每秒;平均密度约为~1 每立方 厘米量级;图 3.4 中还可看到速度约为 350 公里每秒;密度为~10 每立方厘米量 级的慢速太阳风成分,未来将会对该结构进行具体研究,但是由于这部分内容与 火星逃逸关联性不高,本文不做具体表述。





根据图 3.4 中计算得出的太阳风参数,对太阳风动压进行计算。计算结果将依据上游太阳风动压参数划分为两组:第一组为动压大于 1 纳帕 (nPa);第二组为动压小于 0.45 纳帕;对比太阳风动压变化对火星空间环境和重离子分布的影响。其中,太阳风动压对热氧离子 (>30eV)的影响结果如图 3.5 所示。





图 3.5 (左)为弱太阳风动压条件,(右)为强动压条件;坐标系为 MSO,颜色代表离子的平均通量;红色和紫色为模型给出的平均弓激波和磁层边界位置。在 3.5 (右)中,太阳风动压增强使火星感应磁层剧烈收缩,向阳面和磁尾均观测到了平均通量约为~10<sup>10</sup> (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)的尾向氧离子流。而弱动压条件下, 30eV 以上氧离子在向阳面、磁层内平均通量与磁鞘中的背景值相当。因此,对两图进行对比可清晰的展现太阳风动压增强对离子加速过程和离子平均通量的改变。





图 3.6 与图 3.5 类似, 展现的是能量小于 30 电子伏特的氧离子在两组太阳风动压条件下的观测结果统计图。如图所示,由图 3.6 (左),平均磁层边界模型与观测结果吻合得较好,而在高太阳风动压下,动压将火星磁层边界的压缩展现成近流线型。另外值得一提的是,在图 3.6 两组不同太阳风条件下,火星夜侧磁层

均可观测到氧离子平均通量的南-北不对称性。

图 3.7 与图 3.5 类似, 展现的是太阳风动压条件变化对氧分子离子空间分布 状态的改变。氧分子离子随太阳风动压的变化关系与氧离子观测结果类似,因此 本小节之后的内容不再对氧分子离子进行单独讨论,主要以氧离子的结果为主。 氧分子离子除了类似的磁层边界收缩、南-北不对称现象之外,对比图 3.5 和图 3.7 第一行结果可见,能量大于 30eV 的热氧离子在弱太阳风动压条件下, pickup 过程会比强太阳风动压条件下更显著。

这一现象可能表明,当太阳风动压增强时,其动量传输效率反而可能降低、 而动压弱时动量传输效率高,因此太阳风动压对离子总逃逸率的影响可能是一个 有限的范围。但是,这只是一种可能性假设,其具体关系,需要未来进一步详细 的分析和讨论。



图 3.7 MAVEN 氧分子离子与太阳风动压的关系

如图 3.8 所示,图 3.8 (左)和 3.8 (右)分别为 Mars Express 和 MAVEN 探测器在火星磁尾-3 至 -1, -2 至 -1 个火星半径处观测到的太阳风动压和离子尾

向通量关系图。图中横坐标为太阳风动压,纵坐标为磁层中的热氧离子通量,不同颜色的圆点表示在磁尾不同位置截面内的平均尾向通量,黑色星点是上述截面内尾向通量的中位数,红色三角形是截面内尾向通量的平均值。两颗卫星均显示太阳风动压和热氧离子的尾向通量呈现线性相关性,与太阳风和火星重离子之间的动量传输模型给出的理论预测结果类似。

图 3.8(左)可见,由于 Mars Express 离子数据时间分辨率较低,导致计算 结果相对分散;图 3.8(右)MAVEN 的观测结果则展现了太阳风与尾向逃逸通 量的线性正相关关系。这一结果从侧面反映了太阳风-*v*×*B*电场是火星磁层重离 子加速过程的主要控制因素和重要能量源。



图 3.8 Mars Express、MAVEN 氧分子尾向通量与太阳风动压的关系

### 3.2.2 太阳 XUV 辐射

太阳 XUV 辐射是决定火星中性大气和火星电离层膨胀高度的重要因素。 XUV 的变化周期主要与火星公转轨道距离变化引起的2年周期和11年太阳活动 性变化有关。由于 XUV 辐射的变化幅度并不剧烈、Mars Express 也没有携带测 量 XUV 辐射通量的相关仪器,本节内容主要从 MAVEN 探测器 2014 至 2018 年 共4年,即2个火星年的观测数据对 XUV 辐射对火星电离层、全球离子逃逸通 量的影响进行探讨。

图 3.9 所示为氧离子在 MSO 坐标系内两种 XUV 条件下的全球分布情况,图 48

3.9(左)为低 XUV 辐射(小于 1.4 mW/m<sup>2</sup>),图 3.9(右)反之(大于 1.7 mW/m<sup>2</sup>); 颜色代表氧离子的平均通量,红线和紫线分别为弓激波和感应磁层边界的平均位 置。第一栏为低能氧离子(<30eV),第二栏为热氧离子。图 3.9(第一栏)可以 明显的看到低能氧离子的南北不对称性;但是,由于 MAVEN 探测器观测时间所 在的 2014 至 2018 年间太阳活动性并不强,因此图中结果并不存在统计学意义。 由于飞船轨道效应导致的有限覆盖次数是导致图 3.10 中离子分布的主要原因。 图 3.10 第一栏为 MAVEN 实际观测数据结合模型给出的 XUV 辐射强度,第二栏 为太阳黑子数,第三栏为火星-太阳之间的距离。



图 3.9 MAVEN 氧离子与 XUV 辐射的关系

由图 3.10 所示可见,XUV 辐射强度主要与太阳活动性和日火距离有关。在 2014 年 11 月至 2018 年 7 月期间,太阳活动性逐渐减弱,导致强 XUV 辐射条件 集中在 2015 年 6 月,造成了观测结果受轨道效应的限制,如图 3.9 所示。



图 3.10 MAVEN 火星 XUV 辐射与太阳黑子、日火距离的关系

图 3.11(上)展示的是 XUV 辐射变化对低能氧离子(<30eV)尾向逃逸率 的影响,图 3.11(下)为 XUV 对热氧离子(>30eV)的影响;蓝色为低 XUV 辐射组,红色为强 XUV 对照组。结果显示,两条曲线之间的差值并不明显,热氧 离子逃逸率~10<sup>24</sup>(s<sup>-1</sup>)量级,低能氧离子逃逸率则比热氧离子整体高了约一个 量级。在 XUV 升高的情况下,尾向离子逃逸率的略有增高;但是,由于 MAVEN 数据低空间覆盖率的原因,两图的结果不具备统计学意义。综上所述,关于 XUV 辐射与离子逃逸的研究需要等待高太阳活动性下的观测数据进行进一步探讨。



图 3.11 MAVEN 氧分子尾向逃逸率与 XUV 辐射的关系(中位数)

# 3.2.3 行星际磁场

由于 Mars Express 没有携带磁强计,无法测量行星际磁场强度和方向,本小 节仅使用 MAVEN 探测器采集的离子数据对行星际磁场与离子逃逸之间的关系 进行分析。行星际磁场与火星电离层相互作用是火星感应磁层产生的原因,当行 星际磁场方向与星球表面平行时,磁力线悬挂、堆积在火星磁层边界,能够观测 到明显的火星感应磁层边界,如图 3.2 所示。而当行星际磁场方向与星球表面垂 直时,感应电流最弱,此时感应磁层的产生主要依赖于法拉第电磁感应定律,即 磁场随时间的变化率。因此,整个火星感应磁层较为稀薄,太阳风等离子体能够 进入并充满整个磁层。





当行星际磁场与星球表面垂直时,火星空间环境如图 3.12 所示。MAVEN 探测器于 2015 年 1 月 16 日 UT 22: 15 左右从太阳风经弓激波进入磁鞘,此时由于

行星际磁场于日-火连线平行(与星球表面垂直),磁鞘中的波动现象非常丰富。 在 22: 45 分左右,飞船经磁层堆积区边界进入感应磁层,与图 3.2 中不同的是, 此时火星磁层中依然观测到了很强的太阳风质子信号(图 3.12 (d)),并且与电 离层离子成分混合。MAVEN于 23:40 左右飞出磁层进入磁鞘并于1月17日00: 10 再次进入太阳风。

为了进一步统计研究行星际磁场与磁尾离子流量的关系,这里引入圆锥角的 定义(Cone Angle),圆锥角是行星际磁场方向与太阳-火星连线的夹角,当夹角 呈 90 度时,行星际磁场方向与火星表面平行,磁力线在 MSO 坐标系下垂直悬 挂于火星表面,因此称为垂直组(Perpendicular);与之相反,圆锥角接近 0 度时, 行星际磁场方向与火星表面垂直,磁力线在 MSO 坐标系下近似水平,故称为水 平组(Parallel)。

热氧离子统计结果如图 3.13 所示。火星位于 1.5 个 AU 处,行星际磁场与太阳风流的夹角一般为 45 度左右,图 3.13 中可以看到统计结果位于 45 度附近和 135 度附近的两个统计峰值。由于行星际磁场变化速度很快,通常小于 MAVEN 完成一次飞越所需的 4.5 小时。因此,图中红色柱线表示 MAVEN 穿入弓激波前 行星际磁场的方向,橙色柱线为穿出后的测量结果;分组原则为垂直组 Cone Angle 大于 60 度小于 120 度,平行组则反之。



图 3.13 MAVEN 行星际磁场圆锥角统计分布图

根据行星际磁场和太阳风流的方向,将离子数据转换至 MSE 坐标系下,结 果如图 3.14 所示。图中红色为弓激波模型,紫色为磁层模型,颜色代表热氧离 子(>30 eV)的尾向通量,坐标轴单位为火星半径。图 3.13 中第一排为磁尾 -2 至 -1 个火星半径处的平均离子流量分布,第二排为磁尾 -1 至 0 处离子分布。 在近火空间,行星际磁场垂直的情况下,磁层中的离子在-v×B 正方向聚集,呈 现明显的半球不对称性分布,如图 3.14 (b)所示,这些氧离子的回旋半径迅速 超过 MAVEN 轨道高度。图 3.14 (a)中 pickup 氧离子已无法再被 MAVEN 探测 器观测。当圆锥角更接近平行的情况下,pickup 离子虽然呈现了电场正方向聚集 的半球不对称分布,但不如图 3.14 (b)集中。两种情况下通过计算得到的氧离 子平均尾向流通量并未发现明显区别,其原因有待未来 MAVEN 数据进一步的积 累后进行更加具体细致的分析。



图 3.14 MAVEN 行星际磁场方向与磁尾热氧离子(>30eV)分布的关系

在火星夜侧 -2 至 -1 个火星半径区域分布着火星磁尾电流片。在 MSE 坐标 系下,火星磁尾与金星磁尾应类似呈现对称性分布。但在图 3.14 (a, c)中,无 法从观测结果里识别出明显的火星电流片结构,图 3.14 (a)中磁层边界内侧可 以识别磁尾氧离子,但其空间分布整体向左侧倾斜。图 3.14 (c)中离子分布更 加发散,无法得到理想的统计结果。根据本文1.3.2.4 小节的背景介绍可知,由 于剩余磁场的影响,火星磁尾电流片的结构非常复杂,因此,对行星际磁场、感 应磁层、剩余磁场之间的相互关系仍有待观测数据的积累,以便对火星磁尾电流 片的具体形态进行分析和归纳。

#### 3.3 剩余磁场对离子逃逸的影响

剩余磁场与火星电离层热电子、超热电子、电离层上边界的关系已经得到了 较为初步的认识,但是对离子行为的影响尚不明确。相较于 Mars Express, MAVEN 探测器携带了时间分辨率更高的离子分析仪,对 30 电子伏特以下的低 能离子也能够进行比较准确的测量,因此,对于揭示火星剩余磁场对离子逃逸的 作用提供了非常有效的研究工具。

### 3.3.1 全球逃逸通量

研究剩余磁场对离子逃逸的直接影响,可对比火星南北半球的尾向逃逸通量 大小。图 3.15 展示的是 MAVEN 探测器四年的统计结果,浅蓝色圆圈线表示氧 离子的全球逃逸率,红色星线为南半球的逃逸率,蓝色三角形线对于北半球一侧 的逃逸率。首先,从逃逸率量级来看,尾向逃逸的总通量约为~10<sup>24</sup>(s<sup>-1</sup>)量级, 其整体趋势比较平稳。南-北半球测量的离子逃逸通量存在差异,但其差值并不 显著,且随着距离的增加逐渐减小。值得一提的是,图中左右两部分显示的热氧 离子和低能氧离子的逃逸通量基本相等,因此可以判断,根据 MAVEN 2014 年 至 2018 年弱太阳活动性下的观测数据统计结果显示,氧离子在磁层中的总逃逸 率约为~10<sup>24</sup>(s<sup>-1</sup>)量级。



由于火星剩余磁场伴随火星一起自转,磁尾计算出的南、北半球氧离子逃逸 率并不考虑这一过程,且有可能通过统计平均的方式将火星自转的影响消除,因 此,为了进一步具体的研究火星剩余磁场与离子逃逸率的关系,根据剩余磁场自 转过程中地方时的不同,分析剩余磁场对火星离子造成的局地效应。

#### 3.3.2 太阳风-离子相互作用

4年的MAVEN 探测器观测数据结果显示,当火星剩余磁场旋转至向阳面时, 热氧离子(>30eV)外流通量在低高度剩余磁场区域出现一个异常的低值区。如 图 3.16 所示,图中观测数据展示的是 MAVEN 探测器在火星向阳面(地方时 6 时至 18 时)400 至 450 公里区间观测到的热氧离子(>30eV)外流通量。外流的 定义为离子流速方向与星球表面垂直且径向向外。图中横纵坐标分别为火星地理 经纬度,颜色代表出流通量平均值,黑色实线为火星剩余磁场在 400 公里高度处 的等值线图。由图中结果可见,出流通量的高值区域主要分布在火星南半球东经 150 度至 240 度之间,和火星剩余磁场强度最强的区域吻合。剩余磁场区域,热 氧离子的出流通量约为~10<sup>9.5</sup>(s<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>)量级,而在无磁场区域的出流通量约为 ~10<sup>11</sup>(s<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>)量级,约为低值区的 10 倍。







为了进一步确认热氧离子出流通量与火星剩余磁场的相关性,对图 3.16 观 测到的低值区在火星不同高度处的分布进行了进一步研究,其结果如图 3.17 所 示。图 3.17 展示了距离火星地表 250 公里至 600 公里高度区域内,每 50 公里区

间中热氧离子出流通量的分布图,其中每张分布图的格式均与图 3.16 相同。

图 3.17 结果显示,从 275 公里至 575 公里,在火星地理北半球上空热氧离 子出流通量约为~10<sup>10.5</sup> (s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>)量级。与之相反,南半球区域在 275 公里处的 出流通量呈现明显低值,这一低值区的面积随卫星高度的升高不断缩小,逐渐向 南侧偏移,至 600 公里处时,已无法直接确认这一低值区是否依然存在。总体而 言,这一低值区域与火星剩余磁场的分布情况吻合度较高,特别是 300 到 450 公 里之间,低值区边界与剩余磁场边界重合。值得一提的是,在剩余磁场强度最强 的南纬 50 度,东经 185 度区域,从 250 公里至 600 公里高度均可观测到这一氧 离子径向外流的低值区。



Low fluxes region above strongest Crustal Field on the Martian dayside

图 3.17 MAVEN 热氧离子(>30eV)外流通量在 250-600 公里处的分布
在火星向阳侧,由于北半球没有剩余磁场的阻隔,太阳风可以在日下点附近 穿透至极低的高度。因此,太阳风对北半球氧离子的 pickup 过程和动量传输过 程也更直接,因此,图 3.17 中观测结果显示北半球低高度处区域热氧离子出流 通量也更高。



图 3.18 MAVEN 太阳风质子平均流量分布图

图 3.18 (左) 和图 3.18 (右) 统计了 MAVEN 在 450 和 550 公里日下点附近 (地方时 9 点至 15 点) STATIC 观测的太阳风质子平均流量分布,图 3.18 (左) 为 400 至 500 公里高度范围内质子数据的统计叠加,可见在火星北半球,太阳风 质子流量约为~10<sup>11.5</sup> (s<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>)量级,与图 2.6 和图 2.8 中 Mars Express 和 MAVEN 在火星向阳面低高度处观测到的太阳风质子流量吻合。北半球太阳风通量比剩余 磁场区域的太阳风通量高了近两个量级,暗示剩余磁场有效阻隔了太阳风流能量 的注入。

将图 3.18(左)与图 3.16 对比可见,氧离子出流通量的高值区与太阳风质 子流分布一致,沿火星剩余磁场边界均可观测到一个明显的阻隔。随着高度的增加,剩余磁场对太阳风的阻隔效应也逐渐减弱,由图 3.18(右)和图 3.19所示, 在 500 至 900 公里的范围,除了剩余磁场最强的南纬 50 度、东经 200 度区域, 其它区域已无法有效对太阳风流进行阻隔。这一结果也与图 3.16 中热氧离子出 流低值区的分布情况吻合。



图 3.19 MAVEN 太阳风质子流通量在 600-900 公里高度处的分布

图 3.19 左栏所示为 STATIC 在日下点附近(地方时 9 点至 15 点)太阳风平 均通量的观测结果;右栏为太阳风质子流线在地理坐标系的分布,由图 3.19 (f) 可见,在 800-900 公里处太阳风流从火星赤道日下点出发,流向南、北两极方向。 在 600-700 公里处,北半球处的太阳风流依旧从赤道流向两极,而南半球剩余磁 场附近的太阳风流则产生了明显偏折,说明剩余磁场可以有效阻隔太阳风的进 入。在剩余磁场较强的南半球东经 120 度至 200 度区域,可以观察到质子流线上 的涡旋。 上述结果表明,火星剩余磁场在向阳侧 250 至 900 公里观测到了热氧离子和 太阳风流的低值区,暗示火星剩余磁场在其上空的有限区域内有效阻止了太阳风 流与氧离子间的能量传递过程。随着高度的升高,由于剩余磁场强度的减弱、这 一阻碍效果也逐渐衰减。

# 3.4 讨论

3.2 小节对离子逃逸与太阳风动压、太阳 XUV 辐射和行星际磁场的相关分析中发现,太阳风动压对全球离子逃逸率的影响最为显著。这一结论与本文引言部分 1.3.2.2 中的背景介绍相吻合。因此,剩余磁场能否对太阳风动压驱动的离子逃逸过程产生影响是评价其有效性的重要依据。

3.3 小节描述了火星向阳面日下点附近太阳风-火星磁层相互作用过程,首次 发现火星剩余磁场可以有效阻碍太阳风向火星低高度区域的渗透,并且在热氧离 子(>30eV)的出流通量分布图上观测到一个与剩余磁场边界吻合的低值区域。 因此,可以推测火星剩余磁场对于阻碍太阳风-火星氧离子的能量传输过程中占 据的重要作用,本小节会对剩余磁场的阻碍作用进行进一步研究和量化分析,并 与前人的观测、模拟结果进行对比。

2003年, Vignes 根据 MGS 卫星磁强计的探测数据在 200~250 公里附近的火 星剩余磁场区域观测到了类似磁通量绳(magnetic flux rope)的结构,因此推测 火星剩余磁场产生了一个微小的磁层(mini-magneto-cylinders),阻碍太阳风与火 星离子的相互作用。随后,Mitchell(2001)利用 MGS 上搭载的电子反射测量仪 (Electron Reflectometer)对火星剩余磁场的结构进行了分析,根据超热电子在 能谱上的分布情况,判断剩余磁场磁力线结构闭合或是开放。



图 3.20 MAVEN 剩余磁场 300-1000 公里闭合磁力线分布图 (Xu et al., 2017)

Xu (2017)利用 MAVEN 上搭载的 SWEA 仪器根据类似的方法对热电子能 谱进行分析,对火星剩余磁场的构型分布进行统计,结果如图 3.20 所示。图 3.20 中展示的是火星向阳面(太阳天顶角小于 90 度)不同高度观测到的闭合磁力线 发生概率,其中红色表示 100%,蓝色表示 0%,绿色和黄色表示发生率约为 50% 和 75%。图中灰色实线指示模型给出的火星剩余磁场等势线。图 3.20 显示, 300-400 公里高度,南半球东经 150 度至 240 度区域闭合磁力线的观测概率为 100%,随着高度上升,这一概率逐渐下降,在 800-1000 公里区间闭合磁力线的 观测概率已不足 50%。 图 3.20 的结果与本文 3.3.2 中的观测结果相符,图 3.20 与图 3.18~3.19 剩余 磁场对太阳风流阻碍效应的影响高度一致,从侧面证实 3.3.2 部分剩余磁场对火 星热氧离子和太阳风质子的结果可靠性。为了试图量化火星剩余磁场在阻碍太阳 风-火星氧离子能量传输的过程中起到的效果以及图 3.16 观测结果中的物理成 因,图 3.21 进一步展示了剩余磁场强度与热氧离子、热氧分子离子的影响。



图 3.21 MAVEN 剩余磁场与离子回旋半径、出流通量的关系

图 3.21 (a, b)为火星剩余磁场较强区域(红线)和极弱区域(蓝线)处的 平均磁场强度和根据实测磁场强度计算出的热氧离子的离子回旋半径随高度的 变化趋势。其中,图 3.21 (a, b)中红色、蓝色线选取的计算区域由图 3.16 对应 颜色的圆圈所示。图 3.21 (c, d)分别为热氧离子和热氧分子离子径向出流通量 和剩余磁场强度以及高度的关系,图中横坐标为模型给出的 400 公里高度处的磁 场强度,纵坐标为 MAVEN 探测器的高度,颜色代表对应横纵坐标下离子出流通 量的平均值。

首先,图 3.21 (a)显示,剩余磁场区域的磁场强度随高度快速下降,至 600 公里高度时两者的差距也不再明显;但是,图 3.21 (b)通过观测数据计算得出

的热氧离子的回旋半径结果显示,在接近1000公里的高度,剩余磁场上空的热 氧离子的回旋半径依然要比无磁场区域小~10倍的差距。图3.21(c,d)进一步 显示,热氧离子和热氧分子离子的出流通量随磁场强度的减弱和高度的增加迅速 增大,剩余磁场上空的低值区在图中反映为图3.21(c)黑色虚线所示的通量边 界。





图 3.22 进一步分析了氧离子出流通量与剩余磁场强度的关系。图 3.22 (a) 所示,横坐标为模型估计的剩余磁场强度,纵坐标为氧离子的平均出流通量,不 同颜色的实线代表不同高度区间的计算结果,具体高度-颜色对应关系如图例所 示。结果显示,磁场强度对热氧离子出流通量的影响最为显著的高度区间为 300 公里至 600 公里,出流通量随磁场强度的增强线性下降,弱剩余磁场区域的出流 通量约为 40 纳特处的 1 倍。而在 600 公里以上的高度,剩余磁场对出流通量的 控制作用减弱,氧离子的出流通量已近似不随磁场强度增强而改变。

图 3.22(b)展示了剩余磁场旋转至不同太阳天顶角位置时对热氧离子出流

通量的影响。随着太阳天顶角的增加,出流通量逐渐减少,但是在 300-500 公里 的区间剩余磁场对热氧离子的保护效果并未发生明显变化。太阳天顶角为 0-30 度和 60-90 度的情况下,强磁场区域的出流通量均约为无磁场区域的一半。



图 3.23 剩余磁场上空电子密度空洞模拟结果(Matta et al., 2015)

本小节观测到的热氧离子出流空洞的物理成因可能与 Matta (2015)剩余磁 场下电离层热电子模拟结果类似。图 3.23 为二维闭合磁力线和开放磁力线结构 下电离层热电子在不同地方时(午前6时至午后8时)的电子密度分布示意图。 当火星剩余磁场旋转至向阳面时,电离层热电子会沿剩余磁场开放磁力线上行扩 散至更高区域,而闭合磁力线区域的电子被束缚,阻碍了纵向输运过程。因此, 如图 3.23 所示,在 400 公里处会形成一个热电子的密度低值区。

对于图 3.16 中所观测到的热氧离子的出流通量低值区而言,在火星北半球 等弱磁场区域中,图 3.21 所示的热氧离子在 200 公里高度处其回旋半径约为~ 200-300 公里,而图 3.3 所示向阳面感应磁层边界在北半球的平均高度为 600 公 里,即无磁场区域的热氧离子可直接由电离层进入磁鞘、从而被太阳风电场捕获 为 pickup 离子逃逸。而在剩余磁场强度较强的区域,热氧离子的回旋半径约为~ 63 10-20 公里量级,这些被捕获的离子可能沿闭合磁力线重新损失在火星大气中,因此在观测结果上显示为出流通量的低值异常。

图 3.24 展示了向阳面时剩余磁场区域热氧离子出流通量与高度的关系,图 中横坐标为距离火星表面的高度,红色和蓝色实线分别表示强磁场区域和弱磁场 区域氧离子的出流通量。可见,出流通量在 400 公里附近达到峰值,随后逐渐下 降。两条曲线之间的差值在低高度区域非常明显,至~900 公里处己不再显著。 其中,在 400 公里高度左右,剩余磁场对氧离子的保护效率最高,可达 35%。计 算结果与 MHD 模型的模拟结果较为一致,Ma et al. (2002)模拟结果显示剩余 磁场在火星向阳面抬升电离层上边界的高度,并且可以形成微小的剩余磁场磁层 ('mini-magneto-cylinders')。并在之后研究中发现在太阳活动性较弱的时期,火 星剩余磁场的自转可以使氧离子、氧分子离子和二氧化碳分子离子的逃逸总和从 2.4×10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>)下降至 2.7×10<sup>23</sup> (s<sup>-1</sup>),使重离子的逃逸总量下降了约一个量级 (Ma et al., 2006)。





Fang et al. (2015) MHD 模拟结果显示,火星剩余磁场在其自转过程中,氧 离子的逃逸率可减少约 20%,氧分子离子的逃逸率减少约 50%。模型显示,剩 余磁场对离子逃逸的影响主要有以下两个:首先,当剩余磁场旋转至火星向阳面 时,可以有效阻止太阳风对火星电离层的渗透以及动量传输过程,此时逃逸率显 著降低;其次,当剩余磁场旋转至晨昏侧时,剩余磁场使火星感应磁层的边界高 度抬升了约 100 公里,并使离子的昼夜输运总量增强,此时剩余磁场反而会使离 子逃逸率增加。Fang et al. (2017) 对上述过程进行进一步研究,并将模型模拟 结果与 MAVEN 观测结果对比,结果显示剩余磁场在上述两个过程的控制下影响 火星全球 56%--67%的离子逃逸通量。

火星剩余磁场结构形成的弱磁场条件可进一步类比延伸, 探讨地磁倒转期间 地球磁场的形态,从而进一步研究行星磁场与离子逃逸之间的关系。图 3.25 所 示为地磁发电机停止后地球的感应磁层位形(图 A)、地球正常时期的偶极子场 磁层(图 B)和火星剩余磁场和感应磁层(图 C)示意图。



**图 3.25 地磁发电机停止后的感应磁层位形,与火星空间环境类似**(Wei et al., 2014) 行星磁场能否有效保护行星大气一直存在争议,Seki et al. (2001)研究结果 显示,地球氧离子的上行通量约为 7.2 × 10<sup>25</sup> (s<sup>-1</sup>),这一损失率在 30 亿年里会 导致地球大气损失约为目前大气含量中 18%的氧气。但是地球磁尾的磁层对流过 程会使大部分离子回流,最终,在低太阳活动性的条件下测量估算的地球氧离子 逃逸率约为 5 × 10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>),即 30 亿年地球大气氧逃逸的损失不足 2%。地球氧离 子的逃逸率与火星和金星观测到的离子逃逸率类似,均为 ~ 10<sup>24</sup> (s<sup>-1</sup>)量级。当 地球磁场发生倒转时,地球的内禀偶极子磁场消失,模型显示其空间环境如图 3.25 (A)所示,此时由于缺少磁尾氧离子回流通道,离子通过极隙区结构上行 从而可能导致大气氧含量的损失,并引发物种大灭绝事件(Wei et al., 2014)。

Barabash (2010)和 Strangeway et al. (2010)认为,地球磁层~10-100个地球半径的庞大磁层既为离子上行提供了通道也使太阳风能量的注入总量增加,且

金星引力与地球类似,其表面大气压~90巴,远高于地球并且缺乏行星磁场, 但是其逃逸率与地球在同一个量级,可见行星磁场对离子逃逸的影响并不显著, 因此,行星磁场对离子逃逸率的影响仍需进一步探讨。



图 3.26 有限偶极子场与离子逃逸的惯性系 (Egan et al., 2019)

Egan et al. (2019) 对类似火星天体的离子逃逸和内禀磁场强度之间的关系 进行了模拟。模拟结果如图 3.26 (左)所示,自上到下依次为逃逸率与磁场强度 的关系;离子逃逸的总能量;对应磁场强度下离子逃逸所需的平均能量。结果显 示,在外界输入条件不变的情况下,当行星磁场从无到有逐渐增强时,逃逸通量 先随之增加,并在 50 纳特附近达到峰值,之后逐渐下降。这一现象的可能性解 释如图 3.26 (右)所示,当行星处于弱偶极子场时,极隙区的开放性磁力线为离 子上行提供了快速逃逸通道,而随着磁层面积的增加,极隙区所占比重逐渐减少, 离子更容易被磁场束缚。

然而,离子逃逸和行星磁场的关系是一个复杂系统下的动态过程,离子逃逸 是离子源、能量源、行星磁场等一系列重要因素相互作用下的最终结果。行星磁 场是否能够有效保护行星大气,还有待观测结果的积累以及进一步研究和探讨。

### 3.5 小结

本章内容从火星离子逃逸的能量来源:太阳风动压、XUV 辐射;离子逃逸的物质源:火星电离层、磁层;以及离子逃逸能量的重要调控因素:行星际磁场和火星剩余磁场对离子逃逸的全球逃逸率的影响进行了定性和定量化研究。

但是,由于某些关键参数观测信息的缺失、Mars Express 离子数据的时间分 辨率不足、MAVEN 观测时间跨度较短和轨道高度等一系列数据限制,本章内容 对太阳风动压、XUV 辐射、行星际磁场方向、剩余磁场局地效应对离子逃逸的 影响开展了有限的研究。其具体结论如下所述:

1, Mars Express 2004 年至 2016 年覆盖了一个太阳活动周期的数据以及 MAVEN 数据 2014 年至 2018 年在弱太阳活动性下的观测数据显示,火星磁层中 的尾向离子流通量与太阳风动压呈线性正相关;

2,太阳 XUV 辐射与全球离子逃逸通量存在正相关性,但是其具体关系有待数据积累后进行进一步研究;

 3,由于火星剩余磁场的影响和行星际磁场观测数据的限制,行星际磁场对 离子逃逸的影响并不显著;

4,火星南半球分布的区域性剩余磁场在近火星空间 300-1000 公里内,有效 阻止了太阳风等离子体的进入,并在该高度范围内观测到了热氧离子(>30eV) 的出流通量低值区以及太阳风质子通量低值区。

火星剩余磁场对热氧离子出流通量的削弱程度在~400公里处达到最强,可 以减少~35%的热氧离子外流,这一结果与模型模拟结果吻合。

# 第4章 剩余磁场与火星空间环境二分性

第3章内容从宏观角度描述了剩余磁场对火星全球离子逃逸通量的影响,并 首次发现了剩余磁场对热氧离子的局地效应。本章内容将进一步分析剩余磁场对 整个火星空间环境和离子逃逸过程的影响。其中,首先介绍剩余磁场引起的离子 分布和逃逸通道的南-北不对称性,其次,对剩余磁场随火星自转引起的重离子 晨-昏不对称性进行简要分析和讨论。本章内容首次建立了离子逃逸二分性和火 星剩余磁场磁层的概念,对于进一步探讨行星磁场与离子逃逸之间的关系起到了 重要的推进作用。

# 4.1 南-北不对称性

火星剩余磁场对重离子的影响大致可以从两个角度进行分析。从离子分布角度分析,剩余磁场分隔了太阳风质子和电离层源的低能离子,导致地理上呈现南-北不对称性;从能量传输的角度,剩余磁场阻碍了太阳风-电离层离子之间的能量传递过程,导致太阳风无法直接与电离层离子相互作用,因此导致低能离子在剩余磁场上空汇聚、而较高能量的热离子则出现密度空洞。本小节将依次从两个角度对上述过程进行研究和分析,并对该现象的成因进行简单讨论和小结。

# 4.1.1 离子分布的南-北不对称性

本文 3.1.2 小节显示,在向阳面太阳天顶角 0 度至 60 度之间的区域,火星南 半球的感应磁层边界比北半球平均高出约 300 公里。由此可见,火星剩余磁场显 著影响了局地的磁层高度以及磁层内的氧离子和氧分子离子的空间分布情况。但 是,由于 Mars Express 离子探测仪时间分辨率较低、对 50 电子伏特以下的离子 无法有效观测,因此,在 MAVEN 探测器返回高时间分辨率的低能氧离子数据之 前,人们对剩余磁场和火星重离子空间分布情况的关系并不明确。第三章 3.3.2 部分已经展示了剩余磁场对能量大于 30eV 氧离子的影响:在低高度形成了一个 出流通量的空洞,本小节将针对这一现象进一步研究,主要探讨火星剩余磁场对 低能氧离子及向阳面太阳风-火星重离子-感应磁层相互作用过程之间的关系。

图 4.1 为 MAVEN 探测器 STATIC 仪器共 4 年的低能氧离子密度观测数据在 火星地理坐标系下的统计分布。图中 x、y 轴分别为火星地理经、纬度, z 轴为 探测器高度,颜色对应 350-950 公里,每 100 公里区间内低能氧离子的平均密度。 图中黑色实线为火星剩余磁场模型在 400 公里高度处的等值线。



Density of low energy O+ ions on the Martian dayside

图 4.1 MAVEN 350-950 公里低能氧离子(<30eV)密度分布图

如图 4.1 所示,随着高度的增加,北半球的低能氧离子密度迅速由~10<sup>2</sup>(/cc) 下降至~10<sup>-1</sup>(/cc),而900公里高度处,强剩余磁场上空低能氧离子密度约为 ~10<sup>1</sup>(/cc),比北半球高了近两个数量级。其中,低能氧离子的密度分布与剩余 磁场的边界轮廓吻合,且随着高度的升高、剩余磁场强度的减弱,对低能氧离子 的汇聚效果也逐渐下降。

将图 4.1 与图 3.17 对比可见,火星剩余磁场对不同能量范围的氧离子存在统 计意义上的分选效果,即低能的氧离子更容易被剩余磁场捕获束缚,而热氧离子 则逐渐加速损失。图 4.1 为首次通过卫星观测数据发现火星剩余磁场对低能氧离子(<30eV)的汇聚现象。然而,在火星向阳面,太阳风与剩余磁场间的相互作用是一个动态的过程,如图 3.3 (右)所示,南半球火星感应磁层边界的平均高度约为~900公里,这些超过 900公里的低能氧离子与太阳风-剩余磁场相互作用之间的联系,在本章 4.1.3 和 4.2.3 小节中会进行讨论。



图 4.2 MAVEN 500-600 公里空间环境的二分性

图 4.2 展示的是火星向阳面 500-600 公里高度 STATIC 观测的热氢离子 (>30eV)、低能氧离子和氧分子离子 (<30eV)和 SWIA 仪器观测的太阳风质子 平均通量分布图 (左列)和速度流线图 (右列)。图中横纵坐标为火星地理经纬 度,剩余磁场模型在图 4.2 (左列)由黑色等值线表示,图 4.2 (右列)由颜色强 弱表示,其中颜色越偏红,剩余磁场强度的强度越高。SWIA 是 MAVEN 上搭载 的主要用于测量太阳风质子的仪器,但是由于其仪器设计原因,无法对离子种类 进行分辨,因此在火星磁层内 SWIA 观测数据会由于火星重离子成分的干扰导致 数据失真。图 4.2 中展示 SWIA 在 500-600 公里的离子通量分布,其结果仅供与 第一栏 STATIC 对氢离子的观测数据进行定性上的交叉验证。

如图 4.2 (左列)所示,~550 公里高度附近,平均通量为~10<sup>12</sup> (s<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>) 的太阳风质子与低能离子沿剩余磁场边界,在其两侧形成了显著的南-北不对称 性分布,这一统计学特征显示剩余磁场在火星向阳面引起的邻近空间环境的不对 称性:在北半球,火星电离层形成的感应磁层不能有效阻挡太阳风在向阳面的渗 透,因此,北半球低能氧离子在~550 公里处存在明显的低值区域;而南半球则 与此相反,图 4.2 (右列)可见,剩余磁场不仅有效阻隔了太阳风流的进入,对 低能离子也有明显的束缚作用。

图 4.2 (c、d 和 f)显示,在南半球东经 180-240 度区域,由于氢离子、氧离 子和氧分子离子回旋半径的不同,统计结果上离子流线的曲率半径也发生了明显 改变。以上结果显示,火星剩余磁场显著影响了低高度区域的火星空间环境,在 其有限的分布范围内可能形成了局地的剩余磁场磁层,与北半球同一高度处的太 阳风形成鲜明对比。

4.1.2 逃逸通道的南-北不对称性

空间环境的不对称性导致离子加速过程的不对称性:地理北半球的电离层重 离子直接被太阳风电场加速、上行逃逸,而南半球的离子则被剩余磁场束缚,主 要通过昼夜输运至夜侧、参与逃逸,因此,形成了逃逸过程的南-北不对称性。 如图 4.3 所示,低能氧离子(<30eV)的速度分布在剩余磁场内形成一个显著的低值区,根据图 3.18~3.20 的观测结果推断,剩余磁场的闭合磁力线显著阻碍了太阳风向氧离子的能量传递。图 4.3 (左)显示剩余磁场对热氧离子速度的影响不明显,但是依旧可以在南半球东经 140 度至 200 度区域识别出一个速度的低值区。而在火星剩余磁场极弱的北半球区域,热氧离子和低能离子的速度均快速上升。图 4.3 展示了 350-500 公里处氧离子的平均速度在火星地理经纬度地图上的分布。





图 4.4 展示的是向阳面 350-500 公里高度中每 50 公里区域内的热、低能氧离 子平均密度分布图。在低高度区域 350-400 公里区间内,氧离子密度根据能量的 不同呈现明显的二分性,图 4.4(a)中剩余磁场上空热氧离子密度约为 ~10<sup>-2</sup>(/cc) 量级,比北半球弱剩余磁场小 2 个量级。图 4.4(b)的分布情况与图(a)相反, 剩余磁场区域低能氧离子密度约为 ~10<sup>2.5</sup>(/cc)量级。其中图 4.4(右)低能离 子密度随高度的变化,也表明了这些低能离子沿闭合磁力线从电离层向上输运的 过程。

随着高度的增加,热氧离子密度的低值区逐渐消失,而剩余磁场对低能氧离子的汇聚现象依旧显著。综合图 4.3~4.4 的结果可见,随着高度的增加,可以观测到北半球低能氧离子向热氧离子的快速转变,而在南半球,剩余磁场在热氧离子密度和速度上均产生了一个低值区,并束缚低能氧离子形成了一个密度上的汇聚和速度上的低值区,从而导致了北半球离子直接逃逸、南半球离子束缚输运这一南-北半球离子逃逸过程的二分现象。



图 4.4 MAVEN 350-500 公里氧离子密度分布的二分性

### 4.1.3 讨论

MGS、Mars Express 和 MAVEN 对火星剩余磁场引起的低高度空间环境的南-北不对称性均有较多观测结果,其中主要是电子数据上显示的火星电离层电子 密度在剩余磁场区域出现的异常高值现象。Ness et al. (2000) 根据 MGS 掩星数 据得到的电离层电子密度剖面发现剩余磁场上空的电子密度标高在180-250 公里 73

异常升高。Duru et al. (2006)根据 Mars Express 上 MARSIS 雷达的数据中~130 公里附近出现的半月形回声信号(oblique echo),推测出火星电离层在剩余磁场 开放磁力线区域,存在一个密度上的"凸起"结构。经过统计分析发现,这些电 离层凸起与剩余磁场分布吻合。Andrews et al. (2014)对上述电离层电子密度"凸 起"随高度的变化进行了研究。MARSIS 雷达测量的电离层电子密度的分布进行 了统计结果如图 4.4 所示,电子密度在剩余磁场分布区域出现了一个异常的高值 区域,这一高值区域的面积随着高度的增加逐渐减小,最高可达 1200 公里。随 后,MAVEN 探测器上 LPW 同样确认了剩余磁场上空 180-350km 电子密度异常 升高且温度异常低值的区域 (Flynn et al., 2017)、NGIMS 同样在在 300-320 公里 确认了沿剩余磁场分布的氧离子和氧分子离子的密度高值区 (Withers et al., 2018)。





由以上观测结果显示,火星电离层中的电子可能沿剩余磁场闭合磁力线向上 输运至~1000公里的高度,但是对离子数据则缺乏相应的观测结果,本文4.1 部分首次提供了低能氧离子密度与剩余磁场和卫星高度的关系,接下来对这一现 象进行简单的分析。





图 4.6 展示的是火星向阳面处低能氧离子和氧分子(<30eV)离子回旋半径 在火星地理经纬度地图上的分布,图中颜色代表离子的回旋半径,黑色实线为模 型给出的 400 公里处的剩余磁场等值线。回旋半径通过 STATIC 实际观测到的离 子速度以及磁强计观测的对应位置的磁场强度进行计算,由图 4.6 所示,氧离子 和氧分子离子的回旋半径均与剩余磁场的分布一一对应,其中,南半球东经 120 至 240 区域、剩余磁场最强地区离子的回旋半径比北半球相应位置小 2 个量级。 另外,在北半球东经 0~60 度和东经 300~360 度附近,两个剩余磁场较强的区 域内,离子的回旋半径比弱磁场区域的平均值小 1 个量级,可见剩余磁场对低能 离子的束缚作用较强。

此外,对比图 4.6 (左)氧离子和 4.6 (右)氧分子离子结果可见,随着离子 质量的增加,剩余磁场对离子的束缚作用迅速减弱,因此,剩余磁场对氧分子离 子、二氧化碳分子离子等更重的电离层成分的影响会比氧离子更弱。

为了进一步量化火星向阳面剩余磁场与低能离子逃逸过程的关系,对氧离子的逃逸通量进行了估算,其结果如图 4.7 (右)所示,图中横坐标为模型给出的剩余磁场强度,左纵坐标和图中虚线为离子的回旋半径,右纵坐标和图中实线为低能氧离子的平均通量,不同颜色对应不同高度计算结果。

如图 4.7(右)所示,强剩余磁场处的氧离子回旋半径为~10公里的量级, 比弱磁场区域小了近一个量级,且剩余磁场对氧离子的束缚作用在 700-800 公里 区间更加明显,剩余磁场对氧离子的汇聚作用随着高度的上升逐渐减弱。



#### 图 4.7 MAVEN 低能氧离子回旋半径、平均通量与剩余磁场的关系

图 4.7 (左) 展示的是 STATIC 仪器对低能离子探测的局限性,图中横坐标 表示的是离子速度与径向分量的夹角,其中 0 度表示离子流沿径向方向,而 90 度表示离子速度与星球表面平行;纵坐标为距离火星 1000 公里高度以下的数据 个数。由于仪器视角原因 STATIC 主要测量水平离子流,这一仪器效应导致想要 研究低能离子与剩余磁场开放性磁力线的关系变得十分困难,因此,无法对氧离 子的出流通量进行完全的统计。

剩余磁场对电离层电子的影响范围可达 1000 公里,因此,对火星向阳面 350-1000 公里范围内低能氧离子回旋半径、平均通量随高度的变化也进行了简要 计算,结果如图 4.8 所示。图 4.8 (左)展示了低能氧离子 (<30eV)回旋半径与 高度的关系,对比可见,在高度为 500-700 公里区域,剩余磁场对低能离子的束 缚作用最为显著,强磁场上空氧离子回旋半径比弱磁场区域小 2 个量级。对应图 4.8 (右)中的氧离子平均通量与高度的变化图中,低能氧离子在弱磁场区域~600 公里附近迅速减少。而强剩余磁场上空 1000 公里高度,氧离子的平均通量为 ~10<sup>10.5</sup> (s<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>)量级,明显高于弱磁场区域。



图 4.8 MAVEN 350-1000 公里低能氧离子回旋半径、平均通量与剩余磁场的关系

# 4.1.4 小结

MAVEN 探测器在太阳活动性较低的 2014 年 10 月至 2018 年 11 月的观测数 据显示:在火星向阳侧 350-1000 公里的区域,太阳风直接与火星电离层相互作 用,北半球低能离子迅速加速、逃逸,观测结果中对应离子从低能离子向热离子 的快速转变;而在火星南半球,可以在密度分布图中观测到低能离子沿剩余磁场 77 分布形成了一个聚集区域,而剩余磁场上空热离子的出流通量在350-500公里出现了一个低值。两种能量范围的离子在密度、速度分布上显示的南-北不对称性,指示了火星向阳面,氧离子逃逸过程的二分性。

如图 4.9 所示,在火星北半球,日下点附近 300-600 公里范围内的氧离子, 能够直接被太阳风电场加速并与迅速进入磁尾发生逃逸;而南半球的剩余磁场有 效束缚了能量小于 30 电子伏特的低能离子、并阻碍了太阳风的能量传递,因此, 剩余磁场强度较强的区域,低能氧离子在离子密度上呈现汇聚效应。这一结果与 电离层电子的分布呈现很好的对应关系,表明剩余磁场在太阳风-电离层相互作 用过程中占据重要作用。



图 4.9 火星空间环境与氧离子逃逸过程二分性示意图

# 4.2 晨-昏不对称性

4.1 小节主要讨论了火星剩余磁场引起的向阳面离子逃逸过程的南-北不对称性,本小节将结合剩余磁场与火星一起自转的动态过程,讨论剩余磁场对太阳风-电离层相互作用产生的影响。研究结果显示,剩余磁场形成了巨大的区域性磁层,其范围远超 MGS 观测结果的预测,这一剩余磁场磁层在共火星自转的过程中对低能离子的昼-夜输运过程产生显著影响,因此,在离子通量图上可以观测到氧离子的晨-昏不对称性。

本小节将首先展示当剩余磁场旋转至不同火星地方时条件下氧离子的晨-昏 78 不对称性分布。然后,结合 MAVEN 探测器于 2017 年 4 月 27 日的一次穿越事件, 对剩余磁场磁层的特征进行简要的分析和讨论。

# 4.2.1 离子分布的晨-昏不对称性

本章 4.1.1 小节展示了在火星日侧区域当剩余磁场旋转至日下点附近时,在 500-600 公里高度对太阳风流产生了显著的阻碍作用。当剩余磁场旋转至晨昏分 界线附近时,剩余磁场对离子流同样存在阻碍作用,其结果如图 4.10 所示。



图 4.10 剩余磁场位于晨/昏侧时重离子流线分布图

图 4.10 显示,当剩余磁场旋转至晨侧(地方时 3-9 时)和昏侧(地方时 15-21 时),高度 500-600 公里区域内低能氧离子和氧分子离子的流线分布图。图中横 纵坐标为地理经纬度,颜色代表剩余磁场的强度。图 4.10 所示,在晨昏分界线 区域的离子流向:晨侧为西向流、昏侧为东向流。对比南、北半球可见,离子流 在经过火星剩余磁场区域时可以观察到显著的阻碍作用,并且可以观察到与图 4.2 类似的曲率半径偏转。从流线图的结果来看,剩余磁场的存在阻碍了晨昏线 区域离子的昼-夜输运过程,因此可能在剩余磁场对应边界区域形成流量堆积区: 即晨侧在剩余磁场东边界堆积,而昏侧相反,这一现象如图 4.11 所示。 图 4.11 (a, c)分别为低能氧离子(<30eV)旋转至晨、昏侧时的平均流向 分布图,而图 4.11 (b, d)为平均流线示意图。图 4.1 根据剩余磁场最强区域所 在位置的地方时,即东经 180 度处的地方时间,作为数据点的全球统一时间,从 而对数据点进行时区转换。经过转换后,统计重建剩余磁场旋转至晨侧和昏侧时, 低能氧离子的全球流速和流线分布。



图 4.11 剩余磁场位于晨/昏侧时高能氧离子流在东/西边界区域的堆积

因此,根据火星自转方向,如图 4.11 (a, b)所示,剩余磁场旋转至火星晨侧,即东经 180 度区域的地方时为午前 6 点;此时地方时为正午的地区为东经 270 度经线区域,地方时为子夜的地区为东经 90 度经线区域,如图 (a)黑线所示。因此,图 (b)流线方向为:从东经 270 度的赤道区(日下点位置)分开,西向流经过剩余磁场所在的晨侧,流向东经 90 度的子夜磁尾区域;而东向流经过东经 0 度所在的昏侧,流至东经 90 度的子夜。

首先,分析图 4.11(b)流线分布,北半球的流线方向如上文所述从赤道区 域的日下点向高纬方向偏转,经东经 180度(晨线)和东经 0度(昏线)流向东 经 90度日下点区域的磁尾地区。而在南半球强剩余磁场区域,日下点区域的低 能氧离子流在剩余磁场东部边界(东经 200度区域)被剩余磁场阻隔,被迫向高 纬方向转向。在图 4.11(a)流量分布图中,可以清晰的识别出南半球东经 200 度区域沿剩余磁场东边界、低能氧离子的平均通量出现了高值现象。而在东经

180 度剩余磁场最强区域,低能氧离子平均通量存在异常低值,表明剩余磁场有效阻隔了低能氧离子的通过。

在图 4.11 (c, d) 结果与晨侧类似,此时全球统一时间为剩余磁场上空的 18 时,即剩余磁场旋转至昏侧时的全球流量"实时照片"。此时日下点在东经 90 度赤道,从该区域出发的东向流在剩余磁场上空被阻隔、在剩余磁场西边界区域 堆积,因此在图 4.11 (c) 中东经 150 度剩余磁场边界观测到离子流的高值异常。

上述现象是剩余磁场引起的晨-昏不对称性第一个特征,即在晨侧、剩余磁 场东边界(东经 200 度)观测到流量高值区域,以及昏侧、西边界(东经 150 度) 观测到流量高值区域。下面介绍晨-昏不对称性的第二个特征:剩余磁场位于晨 侧时,剩余磁场最强区域东经 180 度地区呈现流量异常低值区域;而昏侧,剩余 磁场所在的东经 180 度区域与晨侧相反、呈现异常高值区域。

这一特征的可能性解释为:当剩余磁场位于晨侧时,其闭合磁力线连接晨侧 与夜侧,因此晨侧电离的新生离子会迅速运动至夜侧损失,于是在晨侧观测到一 个流量的异常低值区;反之,当剩余磁场旋转至昏侧时,闭合磁力线连接昏侧和 午侧,因此来自午侧的氧离子会被剩余磁场捕获输运至夜侧,所以形成了高值异 常区。

上述两个不对称现象,即为剩余磁场引起的晨-昏不对称性的主要特征。

进一步研究结果显示,晨-昏不对称性同样受氧离子能量和卫星观测高度的 影响。图 4.12 展示了剩余磁场位于晨侧时,低能氧离子(图 4.12 左列)和热氧 离子(图 4.12 右列)从 400 公里至 600 公里处的平均流量分布图。对比图 4.12 第一行(400km)和第三行(600km)可见,日下点位置、东经 270 度赤道附近 的热氧离子随着高度的增加,其分布面积也逐渐增加,而图 4.12 (左列)的对应 区域处,低能氧离子通量逐渐减少。但是,热氧离子在剩余磁场东边界的东经 200 度区域有效地被剩余磁场阻隔,这一特征随高度变化并不明显。



图 4.12 晨侧时剩余磁场东边界低能/高能氧离子的堆积示意图

以上统计结果显示低能氧离子在剩余磁场旋转至晨、昏侧时,剩余磁场内部 和外部的氧离子分布呈现显著差别,表明剩余磁场有效阻隔了氧离子流的昼-夜 输运过程。其中,昏侧时剩余磁场内氧离子平均通量的高值区表明剩余磁场可能 形成了一个庞大的磁层,该磁层不仅在向阳面阻碍了太阳风-火星电离层的相互 作用(图 4.2),也在晨-昏侧阻碍了氧离子的跨晨昏线流。 本章下一小节,将探究该磁层的具体性质,并以一次 MAVEN 穿越事件为例, 说明剩余磁场磁层对氧离子以及太阳风-磁层相互作用的影响。

# 4.2.2 2017年4月27日穿越事件

为了研究剩余磁场磁层的具体特征,本小节选择了一次特殊的 MAVEN 探测器穿越事件,其飞行轨迹如图 4.13 所示。本次事件选取的 MAVEN 探测器飞行时间为 2017 年 4 月 27 日 05:50 至 07:10。



图 4.13 2017 年 4 月 27 日事件 MAVEN 飞行轨迹

如图 4.13 (a) 所示, 探测器于 05:50 位于火星北半球弱剩余磁场区域, 至 06:25 左右在赤道区域转南向, 06:40 附近进入剩余磁场最强的区域, 之后 MAVEN 至 07:10 一直在火星南半球。图 4.13 (b, c) 为 MAVEN 飞行轨迹在 MSO 坐标 系下 x-y 平面和 x-z 平面的投影。如图 4.13 (b, c) 可见, MAVEN 的飞行轨迹 从 MSO 坐标系下火星的西北向东南方向飞行, 经晨昏分界线在日侧南半球抵达 轨道最低后后抬升。

其观测结果如图 4.14 所示。UT 05:50 飞船位于磁鞘区域,并在 06:00 进入火 星磁层,其中可以观测到磁场强度的突增以及图 4.14 (f,g)中 keV 量级的热离 子的信号,质量谱上显示可能为氧离子和氧分子离子。飞船于~06:27 前后进入 电离层,离子能谱(图 4.14 e, f,g)上看到重离子通量的骤增以及在电子能谱 图(图 d)上识别出能量约为~27eV 的光电子信号。飞船在 06:40 前后抵达轨道 最低点,至 07:00 再次进入磁鞘,途中没有观测到明显的电离层与感应磁层的边

界。

对应图 4.13(a)中 MAVEN 轨道信息可知,飞船在~06:39 进入火星剩余磁场区域,在磁场数据上观测到磁场总强度的骤降以及 By 和 Bz 分量的反向。在之后的~06:48,可以观察到第二个磁场强度的骤降,同时伴随着电子能谱(图 4.13(d))上~100eV 电子通量的骤增以及离子能谱上~10eV 离子通量的增加。此后直至 07:00,电子能谱(图 4.13(d))上均能看到电离层光电子信号以及离子质量上重离子的信号(图 4.13(g)),磁场的扰动也非常小。



另外,值得注意的是,飞船在~07:00 附近进入磁鞘时,离子的成分从低能~10eV 能量的重离子向 keV 能量的太阳质子发生了转变,光电子的信号也突然消失、磁场的扰动随之增加。结合本小节之前的统计结果以及图 4.13 给出的飞船位置信息,判断 MAVEN 探测器的此次穿越事件中经过了剩余磁场形成的磁层,低高度电离层等离子体沿着闭合磁力线上行,导致等离子体的物质成分变化不大,在 06:40 至 07:00 之间没能观测到类似 06:27 时刻的明显电离层边界。4.2.3 的讨论部分将会对这次穿越事件进行进一步详细讨论。

4.2.3 讨论

分析本小节 4.2.2 中 MAVEN 探测器的剩余磁场磁层穿越事件,将 UT 06:54 至 07:04 飞船飞越剩余磁场磁层顶进入火星南半球磁鞘的观测数据进行详细研究,其观测结果如图 4.15 所示。



图 4.15 MAVEN 剩余磁场磁层顶穿越事件

图 4.15(a)为磁强计观测的磁场观测数据;图 4.15(b)为 STATIC 观测到的低能离子(<30eV,蓝色实线)和热离子(>30eV,橙色虚线)的密度以及 LPW 观测到的电子密度(黑色实线),以及 STATIC 观测的太阳风质子密度(红色实线);图 4.15(c)为 SWIA、SWEA 观测结果计算得到的太阳风动压(红色实线)、太阳风的等离子体热压(蓝色实线)、磁层等离子体热压(浅蓝色虚线),磁压(黄色虚线)以及模型给出的剩余磁场磁压(灰色虚线)。图中 T1 时刻为 ~06:57:20,此时飞船位于剩余磁场磁层;T2 时刻为~06:59:10,此时飞船在剩余磁场磁层顶边界层区域;T3 时刻为~07:03:40,此时飞船已位于火星磁鞘,以上三个时刻在图 4.14 能谱观测数据中均由黑色实线指示。

图 4.15 (a) 所示, MAVEN 在 ~06:58 附近穿过剩余磁场磁层顶时, 磁场扰 动明显增加, 且伴随着 Bz 分量和 By 分量的反向, 磁场总强度略有下降。图 4.15 (b) 中展示的离子和电子密度在穿越剩余磁场磁层顶时骤降, 磁层电子和离子 的密度迅速由 ~10<sup>2</sup> (cm<sup>3</sup>) 下降至仪器无法探测的水平, 而氢离子的密度由 ~0.5 (cm<sup>3</sup>) 上升至 ~5 (cm<sup>3</sup>)。对应图 4.15 (c) 磁层中等离子体的热压和磁场的磁 压均为 ~10<sup>-2</sup> (nPa) 的量级, 在 ~06:58 飞船穿越剩余磁场磁层顶后, STATIC 和 LPW 观测到的电离层源等离子体热压迅速下降, 而太阳风动压和太阳风等离子体的热压迅速上升。且观测结果可以观测到与地球磁层顶类似的压强平衡关 系:

为了进一步分析 MAVEN 在穿越剩余磁场磁层中等离子体的具体状态, 对磁 层顶两侧的等离子体数据进行了进一步分析, 结果如图 4.16 所示。





图 4.16 所示,在 T1~T3 三个时刻时,STATIC 测量的离子质量-能量谱图 (Energy-Mass Matrix,EM 谱图),图中横坐标为离子的相对原子质量,纵坐标 为离子的能量,颜色代表离子的能流通量。在 T1 时刻,飞船位于剩余磁场磁层 中,在 EM 谱图中观测为~10eV 量级的低能离子,其离子成分依次对应氢离子、 氧离子和氧分子离子。在 T3 时刻,飞船已进入磁鞘,在 EM 谱图中对应的是 ~300eV 量级的太阳风质子信号。而在 T2 时刻,飞船飞越剩余磁场磁层顶边界区 时,EM 谱图可见电离层源的低能离子和太阳风超热质子的混合。这一结果进一 步展示了剩余磁场磁层两侧的等离子体信息。

但是,由于在磁层顶穿越事件中,并未观测到磁场强度的明显变化,而在穿越时刻~06:58 附近,飞船的飞行高度为 1400 公里。根据本文 3.4 章的内容以及图 3.20 中对剩余磁场形态进行判断的方法,磁力线的构型可以根据 SWEA 探测的光电子信号进行判断 (e.g Xu et al., 2017)。

光电子是火星向阳面大气中的二氧化碳分子或者氧原子吸收 304 Å 氦 II 谱 线释放的,能量约为 23 – 28 eV 的电子,只能在火星向阳面产生。光电子在 SWEA 电子能谱图上的体现如图 4.14(d)所示,从 UT 06:30 分开始,电子能谱上 ~25eV 附近即可观察到明显的光电子信号,如黑色箭头标注指示。值得注意的是,光电子信号在剩余磁场磁层中依旧连续,直至 ~06:58 附近穿过剩余磁场磁层项时才无法识别。



图 4.17 MAVEN 磁层顶两侧电子能谱

在 T1~T3 三个时刻, SWEA 电子能谱如图 4.17 所示。图中横坐标为电子的能量, 纵坐标为电子的能流通量; 根据电子与磁场方向的关系, 将电子流分为两个部分, 图中红线表示电子流运动方向与磁场平行、蓝线代表与磁场反平行。

如图 4.17 所示,在 T1 时刻,电子能谱在~25eV 附近出现明显的光电子信号 峰值,且沿磁力线方向的能流通量完全相等。这一结果表明:SWEA 没有观测到 太阳风电子的信号,磁力线不与行星际磁场相连;而光电子平行/反平行通量相 等,磁力线闭合且两端均与火星电离层相连。这一结果肯定了在卫星 1400 公里 高度处观测到火星剩余磁场磁层的真实性,电离层光电子的信息与图 4.16 (a) 中 STATIC ~10eV 量级的电离层源低能离子信号完全吻合,暗示了电离层等离子 体沿剩余磁场闭合磁力线输运至 1400 公里的高度。

图 4.17(c) T3 时刻电子能谱数据显示,电子峰出现在~70eV 附近,在磁鞘 区域太阳风电子的平均能量范围内,如本文第3章3.1.2小节图3.1 Mars Express ELS 和图 3.2 MAVEN SWEA 观测数据所示。而在磁层顶穿越过程中,图 4.17(b) 中可见,这一边界区域太阳风等离子体和磁层等离子的过渡,光电子已逐渐沿磁 力线进入太阳风,因此磁场方向的电离流通量开始出现明显差异。



Statistical Pressure Distribution at dayside 550 km

图 4.18 MAVEN 500-600 公里等离子体热压和磁压分布图

上述部分对 MAVEN 探测器于 2017 年 4 月 27 日在火星剩余磁场内的一次穿 越事件进行了分析,结果显示剩余磁场磁层可以延伸至1400公里高度,这一观 测结果改变了人们对剩余磁场只能在近火星区域对离子产生局地效应的认识。从 统计结果上看,剩余磁场磁层在低高度区域形成了一个明显的南北等离子体分布 上的不对称,其统计结果如图 4.18 所示。

图 4.18 展示了 MAVEN 探测器于 2014 年 10 月至 2018 年 11 月,共计 4 年 向阳侧等离子热压和磁场磁压观测结果的统计平均值。图中横、纵坐标分别为火 星地理经、纬度,颜色代表压强的大小,单位是纳帕。图中黑色轮廓线是模型给 89 出的 400 公里高度处的剩余磁场模型。图 4.18(a) 至图 4.18(e) 依次为 SWEA 仪器观测太阳风电子热压; STATIC 仪器观测太阳风质子热压; LPW 仪器观测 电离层电子热压; STATIC 仪器观测电离层低能离子热压; SWIA 仪器观测太阳 风动压和磁强计统计计算出的平均磁压。

图4.18 第一栏可以清晰得看到太阳风成分在 500-600 公里高度区域在火星北 半球的汇聚现象,以及太阳风流被南半球剩余磁场阻隔形成的边界;第二栏可以 辨认出电离层等离子体沿剩余磁场闭合磁力线输运至 500-600 公里高度形成的压 强高值区。这一明显的南-北不对称性现象对应了观测事件中剩余磁场磁层内部 压强与外部太阳风压强的平衡。图 4.18 (e) 和 4.18 (f) 太阳风动压以及磁场总 磁压的分布也佐证了上述结论。

MHD 模拟结果同样显示剩余磁场磁层在火星向阳侧能够形成磁层并且有效参与太阳风-火星电离层的相互作用过程。Ma et al. (2002)的模拟结果显示,剩余磁场可以形成微小的磁层以及小型磁通量绳结构。Ma et al. (2003)进一步研究了在不同太阳活动性条件下剩余磁场对电离层的影响。Harnett and Winglee

(2003)根据 Cain 模型给出的剩余磁场模型对太阳风-火星相互作用进行了研究, 结果显示,在火星南半球观测到一个类似剩余磁场磁层顶的结构,其位置接近 0.4 个火星半径(1300 公里),比北半球的磁场堆积边界高出 200-300 公里。但是, 单流体模型的局限性导致不足以描述剩余磁场在太阳风-电离层相互作用中起到 的作用。Harnett and Winglee (2006)多成分 MHD 模拟结果显示,在日下点附近 感应磁层边界于北半球高度达 1360 公里,而南半球在同一高度存在电离层源的 等离子体。这一模拟结果与本文观测内容比较符合,但是其模拟结果过高估计了 北半球感应磁层边界的位置,因此其模型与本文结果的符合程度仍有待验证。

综上所述,火星剩余磁场在南半球向阳侧形成了局地的剩余磁场磁层,这一磁层在随着火星自转的过程中,对离子的晨-昏输运产生了非常重要的作用,图 4.19 对剩余磁场自转引起的低能氧离子密度变化进行了展示。





图 4.19 展示了 300-700 公里之间,南北半球的低能氧离子(<30eV)随太阳 天顶角的变化趋势。图中北半球低能氧离子密度用虚线表示,南半球为实线。从 图中计算结果可见,当火星位于日下点附近时(SZA<30度),350 公里区域火星 南、北半球区域的低能氧离子密度差别并不明显;而随着高度的增加,二者的差 距逐渐加大,可见剩余磁场对低能离子的汇聚作用。

这里需要特别解释一下图 4.19 中紫线 (650 公里) 在日下点附近的离子密度 反而比晨昏线 (SZA 60-90) 附近低的原因。由图 3.3 中剩余磁场对火星感应磁 层边界的统计结果可见。在火星向阳面, MPB 的平均高度为 600 公里,日下点 附近,弱、或者无剩余磁场的区域,其感应磁层边界约为 300~400 公里高度,因 此,日下点 400 公里高度以上,氧离子的密度急剧减少。而在晨昏线附近,MPB 的平均高度较高,平均约为 ~900 公里,在图中紫线 (700 公里) 以下的区域, 仍属于磁层内部区域。由于磁层下边界高度随太阳天顶角的变化,导致了图 4.19 中离子密度随 SZA 减小负增长的原因。

当火星进入夜侧(SZA>120),北半球低能离子密度超过了南半球,暗示剩 余磁场对于离子损失率存在极强的促进作用。

#### 4.2.4 小结

本小节内容基于 MAVEN 探测器于 2014 年 10 月至 2018 年 11 月的离子观测 数据, 对剩余磁场伴随火星自转对离子密度、局地空间环境的影响进行了统计研 究。并根据 MAVEN 探测器于 2017 年 4 月 28 日的一次飞越事件, 对火星剩余磁

场在向阳面形成的剩余磁场磁层进行了探讨,并对这一磁层的磁层顶进行了简单 分析。本小结的主要结论如图 4.20 所示:

1,在向阳面火星剩余磁场上空形成了最高可达1400公里的磁层;

2,当剩余磁场磁层旋转至晨-昏区域时,对其周围的氧离子流存在显著的束 缚作用,与剩余磁场边界低能离子通量的高值异常区对应。

3,剩余磁场位于晨侧时,其闭合磁力线与夜侧电离层相连,形成了低能氧 离子密度的低值区;剩余磁场位于昏侧时,闭合磁力线与午侧相连,形成了低能 氧离子密度的高值区。这一鲜明对比组成了低能氧离子密度分布的晨-昏不对称 性。



图 4.20 剩余磁场磁层与离子分布的晨-昏不对称性
### 第5章 总结与展望

本文第二章到第四章的内容介绍了我在攻读博士期间的主要工作:基于 Mars Express 和 MAVEN 探测器的就位观测数据,对离子逃逸通量和太阳风动压、 太阳 XUV 辐射、剩余磁场之间的相互关系进行了研究,并首次建立了火星空间 环境与离子逃逸通道二分性的概念。但是,受限于当前的仪器条件,这些工作大 多是一些非常初步的统计,虽然研究结果首次证明了剩余磁场对火星重离子的束 缚作用、首次观测并证明了火星剩余磁场磁层的概念,但其价值也仅仅在定性研 究和量级评估上起到了有限的作用。

随着探测仪器的不断发展,对离子逃逸过程和逃逸通道的认识也会日益加 深,对当前一些难以测量的过程和难以认识的机制必将产生新的理解。在本章的 小节,将主要分为三个部分进行展望。

首先,对目前探测手段可以支持的逃逸研究进行计划和准备,同时,也对目前探测水平无法实现但尚可预见的离子逃逸通道进行展望,以待未来新技术的实施和探索;

其次,对中国 2020 年开展的火星计划及未来火星探测热潮进行展望;

最后,将立足火星放眼系外行星,随着系外行星探测计划的不断开展,对系 外行星大气条件等参数的观测资料将对于揭示行星气候演变与行星宜居性等一 系列重要问题带来新的机遇和挑战。

#### 5.1 研究总结

当前对火星离子逃逸过程和剩余磁场关系的研究还停留在比较初步的阶段。 1998年, MGS 率先发现火星存在剩余磁场; 2003年 Mars Express 首次对火星离 子数据进行了较为详细的探测;随着 2014年 MAVEN 探测器观测数据的返回, 对剩余磁场影响下的离子逃逸过程的研究才得以逐步开展。

我的工作首先从能量来源与传输的角度,定性的分析了外界驱动源和火星剩余磁场对全球性火星离子逃逸的影响。其次,针对剩余磁场在低高度对火星重离

子产生的局地效应,探讨了剩余磁场在太阳风-火星磁层相互作用过程中的重要 作用,并建立了离子逃逸通道的南-北不对称性以及剩余磁场磁层概念。另外, 剩余磁场随火星一起自转,其对重离子的束缚是一个随自转周期变化的动态过 程,因此,本文也对剩余磁场影响下的离子晨-昏不对称性进行了简要分析。

本文工作的主要结果如下:

第三章内容探讨了离子逃逸率与太阳风动压、XUV 辐射以及影响能量传输 效率的参量如:行星际磁场和火星剩余磁场之间的关系,结果显示:

1,12年 Mars Express 观测结果显示,太阳天顶角 0-60 度区域,北半球感应 磁层边界平均高度约为 ~600 公里,南半球感应磁层边界平均高度约为 ~900 公里;

2,火星磁层形状和大小直接受太阳风动压控制,磁层中尾向离子流通量与 太阳风动压之间存在极强的正相关性;

3,在火星向阳面,当剩余磁场旋转至日下点附近时,在南半球剩余磁场上 空 350-600 公里区域可以观察到热氧离子(>30eV)低速度、低密度、低通量的 异常区;

 4,火星向阳面 300-600 公里区域,热氧离子通量随剩余磁场强度增加呈线 性减少趋势;

5,日下点区域,剩余磁场对局地热氧离子出流通量的阻碍效果最多可达 35%。

第四章对剩余磁场引起的离子分布的南-北不对称性和的晨-昏不对称性进行了简单研究,其主要结论如下:

1,当剩余磁场旋转至日下点附近时,剩余磁场在其上空 200-1000 公里范围
 内有效阻碍了太阳风流的进入,并伴随着低能离子密度和通量上的汇聚现象。

2,剩余磁场在向阳面区域形成了一个局地磁层、其磁层顶特征与地球磁层 顶存在一定的类似性;

3,2017年4月27日飞越事件显示,在向阳侧剩余磁场磁层最高可达1400 公里;

4,剩余磁场磁层有效阻碍了太阳风对火星重离子的能量传输过程,导致离

子逃逸通道上的南-北不对称性;

5,剩余磁场在伴随火星旋转至晨、昏侧时,对于背景的离子流同样存在非常显著的阻碍作用,并在相应边界形成离子流的通量的高值区;

6,低能氧离子密度分布上存在晨-昏不对称性,即晨侧时,剩余磁场上空氧 离子密度比周围低;昏侧时,低能氧离子密度比弱磁场区高。

最后,本文中展示的所有结果均基于 2004 年 2 月至 2016 年 9 月,共计 12 年的 Mars Express 观测数据和 2014 年 10 月至 2018 年 11 月,共计 4 年的 MAVEN 探测器观测数据。在 2014 年至 2018 年这四年间,太阳活动性并不强; Mars Express 的探测数据虽然覆盖了一个太阳活动周,但是从 2004 年开始为第 23 个太阳活动 周的下降期,2010 年开始的第 24 个活动周又较弱,因此可以总结本文所有的观测结果均基于弱太阳活动性下。还需要等待太阳活动性较强时期的数据进行对比研究,才能比较为完整的对离子逃逸过程进行统计和分析。

### 5.2 未来展望

本文对目前已取得有效观测的离子逃逸过程进行了讨论,并将离子逃逸根据 逃逸通道的不同进行了汇总和归纳。本文对太阳风等能量源对离子逃逸的影响进 行了简单估计,但是,仍有一些本文没有涉及的物理过程同样可以对离子进行加 热:如弓激波、磁层边界区域的波动;向阳面磁层边界区域的磁张力等等,对于 这些过程,目前仍缺乏具体的观测事实对其进行讨论和分析。因此,未来的工作 涵盖进一步基于 MAVEN 探测器和及其他空间探测项目取得的观测数据对离子 逃逸机制进行探讨。

另外,本文首次在 1400 公里的高度观测到了火星剩余磁场磁层边界,并对 剩余磁场与离子逃逸之间的关系提供了新的认识。但是,火星剩余磁场磁层的结 构和形态尚不清楚、剩余磁场中强度有限的闭合磁力线能否产生类似地球磁层顶 电流、磁层边界区 K-H 波、磁层顶重联等一系列过程尚待进一步详细的分析和 讨论。此外,剩余磁场对离子逃逸全球逃逸率、火星磁尾电流片、全球感应磁层 的影响也仍存争议,需要未来继续开展细致的研究。

离子逃逸作为大气逃逸过程的一部分,其与中性大气逃逸之间的关系也值得

详细探讨。如:火星大气光化学反应产生的热氧原子在逃逸层底以上高度会直接 逃逸离开火星,形成氧冕(oxygen corona)。这些氧原子在空间环境中被太阳辐 射电离后可以被-v×B 电场加速至 keV 至 MeV 量级、再次回到火星大气并对大气 分子撞击,产生溅射(sputtering)逃逸;然而,这些过程目前仍然尚未取得可靠 的观测,其逃逸通量也很难进行有效的估算,有待未来探测手段的进步。

其次,由于目前的观测手段主要采取单颗卫星、环绕探测的探测模式,导致 观测数据的空间覆盖率极低、无法对离子的全球性逃逸过程进行及时有效的测 量。因此,在未来的工作中,可以开展地基、或者天基望远镜与卫星探测相结合 的方式,对火星全球离子逃逸过程和太阳风、行星际磁场等高速变化的控制因素 之间的响应进行有效的观测。从而更好的从整体系统性上对离子的全球逃逸率进 行评价和估计。

自 1960 年前苏联第一次试探性的发射火星探测器开始,火星便一直是行星 探测中的热点。而中国的火星探测才刚刚起步,长征五号搭载的中国行星探测系 列"天问一号"火星探测器于 2020 年 7 月 23 日成功发射,飞往火星。预计将于 2021 年 2 月抵达,开展就位和着陆探测任务。同年 7 月 19 日,阿联酋"希望号" 探测器于日本鹿儿岛成功发射;同年 7 月 30 日,美国国家航空航天局火星探测 任务"火星 2020"携带"毅力号"火星车和"机智号"直升机踏上火星探测的 旅途。仅在 2020 年 7 月的发射窗口,便有三颗火星探测器同时飞往火星。

在之后的 2022-2024 年, 欧洲航空航天局"ExoMars 2022"、日本航天局 "Tera-hertz"、印度"Mangalyaan-2"等火星探测计划也将陆续开展, 火星将依 旧是未来行星探测的重点。与此同时,中国第二次火星计划也同样已在筹备之中。 火星离子、大气成分,以及火星剩余磁场,是能够反映火星地质历史、气候演变、 内部结构等重要信息的关键参数,将在很长的一段时间内持续作为火星空间探测 的热点。这意味着未来在更多观测数据的积累下,研究火星离子和大气逃逸的长 周期变化成为可能。

最后,火星是太阳系内三颗类地行星中与地球最为相似的天体。水星没有大 气,整个表面常年暴露在太阳风和太阳辐射之中、金星过剩的温室效应导致其地 表平均温度可达 737 开尔文(464 摄氏度);这两颗行星严酷的表面环境导致既

不适宜人类居住,也不适合液态水的存在和生命的延续。

而火星北极的冰盖、表面流水和冰川构造的痕迹、南半球与地球海底磁场形 态类似的剩余磁场等证据均表明火星历史上可能存在过液态海洋,并且拥有长达 几亿年的温暖、湿润的气候。这一与地球类似、可能诱发生命起源的环境,使火 星成为研究地外生命的首选。而离子逃逸和剩余磁场,则是揭开火星气候演变之 谜的重要线索之一。因此,研究行星磁场和大气逃逸与气候变化的关系,将是未 来很长一段时间内火星科学的研究主题。

倘若把目光投向更遥远的太阳系外,自 1989 年第一颗系外行星发现以来,随着掩星探测技术的进步,30 年间观测到的系外行星已达 4200 余颗。特别是 Kepler 太空望远镜,9 年的探测时长内,截至目前已确认了 3800 余颗系外行星。 可以预见的是,在未来 20 到 30 年中将有更多的系外行星得到观测和确认,随着 样本数量的增加,行星磁场与离子逃逸、大气演化、太阳系和生命起源等一系列 重要问题的研究将不再局限于太阳系内的小样本案例分析。立足火星,放眼系外, 人类的"天问"之旅,或许才刚刚开始。

# 参考文献

欧阳自远, 邹永廖等.火星科学概论[M].上海: 上海科技教育出版社, 2015. 涂传诒等.日地空间物理学(行星际与磁层) [M].北京: 科学出版社, 1988.

Acuña MH, Connerney JEP, Wasilewski P, et al. Magnetic Field and Plasma Observations at Mars: Initial Results of the Mars Global Surveyor Mission[J]. Science: 1998, 279: 1676.

Acuña MH, Connerney JEP, Wasilewski P, et al. Magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits[J]. Journal of Geophysical Research: Planets: 2001, 106: 23403-23417.

Andrews DJ, Edberg NJT, Eriksson AI, et al. Control of the topside Martian ionosphere by crustal magnetic fields[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2015, 120: 3042-3058.

Andrews DJ, Opgenoorth HJ, Edberg NJT, et al. Determination of local plasma densities with the MARSIS radar: Asymmetries in the high–altitude Martian ionosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2013, 118: 6228-6242.

- Arkani-Hamed J. Thermoremanent magnetization of the Martian lithosphere[J]. Journal of Geophysical Research: 2003, 108.
- Barabash S. Venus, Earth, Mars: Comparative Ion Escape Rates[J]. EGU General Assembly Conference Abstracts: 2010: 5308.
- Barabash S, Fedorov A, Lundin R, et al. Martian Atmospheric Erosion Rates[J]. Science: 2007, 315: 501.
- Barabash S, Lundin R. ASPERA-3 on Mars Express[J]. Icarus: 2006, 182: 301-307.
- Barabash S, Lundin R, Andersson H, et al. The Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms (ASPERA-3) for the Mars Express Mission[J]. Space Science Reviews: 2007, 126: 113-164.
- Bauer SJ, Hartle RE. On the extent of the Martian ionosphere[J]. Journal of Geophysical Research (1896-1977): 1973, 78: 3169-3171.
- Benna M, Mahaffy PR, Grebowsky JM, et al. First measurements of composition and dynamics of the Martian ionosphere by MAVEN's Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer[J]. Geophysical Research Letters: 2015, 42: 8958-8965.

- Bertaux JL, Leblanc F, Witasse O, et al. Discovery of an aurora on Mars[J]. Nature: 2005, 435: 790-794.
- Bougher SW, Cravens TE, Grebowsky J, et al. The Aeronomy of Mars: Characterization by MAVEN of the Upper Atmosphere Reservoir That Regulates Volatile Escape[J]. Space Science Reviews: 2015, 195: 423-456.
- Brain DA. Mars Global Surveyor Measurements of the Martian Solar Wind Interaction[J]. Space Science Reviews: 2006, 126: 77-112.
- Brain DA, Bagenal F, Acuña MH, et al. Observations of low-frequency electromagnetic plasma waves upstream from the Martian shock[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2002, 107: SMP 9-1-SMP 9-11.
- Brain DA, Baker AH, Briggs J, et al. Episodic detachment of Martian crustal magnetic fields leading to bulk atmospheric plasma escape[J]. Geophysical Research Letters: 2010, 37: n/a-n/a.
- Brain DA, Barabash S, Bougher SW, et al. Solar Wind Interaction and Atmospheric Escape[C]. Cambridge University Press, 2017: 464-496.
- Brain DA, Halekas JS, Lillis R, et al. Variability of the altitude of the Martian sheath[J]. Geophysical Research Letters: 2005, 32.
- Brain DA, Lillis RJ, Mitchell DL, et al. Electron pitch angle distributions as indicators of magnetic field topology near Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2007, 112.
- Brain DA, Mcfadden JP, Halekas JS, et al. The spatial distribution of planetary ion fluxes near Mars observed by MAVEN[J]. Geophysical Research Letters: 2015, 42: 9142-9148.
- Brecht SH, Ledvina SA. The Solar Wind Interaction With the Martian Ionosphere/Atmosphere[J]. Space Science Reviews: 2006, 126: 15-38.
- Brecht SH, Ledvina SA. The role of the Martian crustal magnetic fields in controlling ionospheric loss[J]. Geophysical Research Letters: 2014, 41: 5340-5346.
- Cain JC, Ferguson BB, Mozzoni D. An n = 90 internal potential function of the Martian crustal magnetic field[J]. Journal of Geophysical Research: Planets: 2003, 108.
- Coates AJ. Ion pickup at comets[J]. Advances in Space Research: 2004, 33: 1977-1988.
- Collinson G, Glocer A, Xu S, et al. Ionospheric Ambipolar Electric Fields of Mars and

Venus: Comparisons Between Theoretical Predictions and Direct Observations of the Electric Potential Drop[J]. Geophysical Research Letters: 2019, 46: 1168-1176.

- Collinson G, Mitchell D, Glocer A, et al. Electric Mars: The first direct measurement of an upper limit for the Martian "polar wind" electric potential[J]. Geophysical Research Letters: 2015, 42: 9128-9134.
- Connerney JEP, Acuña MH, Ness NF, et al. Tectonic implications of Mars crustal magnetism[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America: 2005, 102: 14970.
- Connerney JEP, Espley J, Lawton P, et al. The MAVEN Magnetic Field Investigation[J]. Space Science Reviews: 2015, 195: 257-291.
- Connerney JEP, Espley JR, Dibraccio GA, et al. First results of the MAVEN magnetic field investigation[J]. Geophysical Research Letters: 2015, 42: 8819-8827.
- Crider DH, Acuña MH, Connerney JEP, et al. Observations of the latitude dependence of the location of the martian magnetic pileup boundary[J]. Geophysical Research Letters: 2002, 29: 11-11-11-14.
- Cui J, Galand M, Yelle RV, et al. Day-to-night transport in the Martian ionosphere: Implications from total electron content measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2015, 120: 2333-2346.
- Deighan J, Chaffin MS, Chaufray JY, et al. MAVEN IUVS observation of the hot oxygen corona at Mars[J]. Geophysical Research Letters: 2015, 42: 9009-9014.
- Dong Y, Fang X, Brain DA, et al. Strong plume fluxes at Mars observed by MAVEN:An important planetary ion escape channel[J]. Geophysical Research Letters: 2015, 42: 8942-8950.
- Dubinin E, Fränz M, Woch J, et al. Plasma Morphology at Mars. Aspera-3 Observations[J]. Space Science Reviews: 2006, 126: 209-238.
- Dubinin E, Fraenz M, Fedorov A, et al. Ion Energization and Escape on Mars and Venus[J]. Space Science Reviews: 2011, 162: 173-211.
- Dubinin E, Fraenz M, Pätzold M, et al. The Effect of Solar Wind Variations on the Escape of Oxygen Ions From Mars Through Different Channels: MAVEN Observations[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2017, 122: 11,285-211,301.
- Dubinin E, Fraenz M, Pätzold M, et al. Effects of solar irradiance on the upper ionosphere and oxygen ion escape at Mars: MAVEN observations[J]. Journal of 100

Geophysical Research: Space Physics: 2017, 122: 7142-7152.

- Dubinin E, Fraenz M, Pätzold M, et al. Expansion and Shrinking of the Martian Topside Ionosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2019, 124: 9725-9738.
- Dubinin E, Fraenz M, Woch J, et al. Long-lived auroral structures and atmospheric losses through auroral flux tubes on Mars[J]. Geophysical Research Letters: 2009, 36.
- Dubinin E, Fraenz M, Woch J, et al. Upper ionosphere of Mars is not axially symmetrical[J]. Earth, Planets and Space: 2012, 64: 7.
- Dubinin E, Fraenz M, Woch J, et al. Suprathermal electron fluxes on the nightside of Mars: ASPERA-3 observations[J]. Planetary and Space Science: 2008, 56: 846-851.
- 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: 12722-12730.
- Duru F, Gurnett DA, Averkamp TF, et al. Magnetically controlled structures in the ionosphere of Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2006, 111.
- Edberg NJT, Brain D, Lester MF, et al. Plasma boundary variability at Mars as observed by Mars Global Surveyor and Mars Express[J]. Annales Geophysicae: 2009, 27: 3537-3550.
- Edberg NJT, Nilsson H, Futaana Y, et al. Atmospheric erosion of Venus during stormy space weather[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2011, 116: n/a-n/a.
- Edberg NJT, Nilsson H, Williams AO, et al. Pumping out the atmosphere of Mars through solar wind pressure pulses[J]. Geophysical Research Letters: 2010, 37: n/a-n/a.
- Egan H, Jarvinen R, Ma Y, et al. Planetary magnetic field control of ion escape from weakly magnetized planets[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: 2019, 488: 2108-2120.
- Ehlmann BL, Mustard JF, Murchie SL, et al. Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars[J]. Nature: 2011, 479: 53-60.
- Fang X, Liemohn MW, Nagy AF, et al. On the effect of the martian crustal magnetic

field on atmospheric erosion[J]. Icarus: 2010, 206: 130-138.

- Fang X, Liemohn MW, Nagy AF, et al. Pickup oxygen ion velocity space and spatial distribution around Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2008, 113.
- Fang X, Ma Y, Brain D, et al. Control of Mars global atmospheric loss by the continuous rotation of the crustal magnetic field: A time-dependent MHD study[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2015, 120: 10,926-910,944.
- Fang X, Ma Y, Masunaga K, et al. The Mars crustal magnetic field control of plasma boundary locations and atmospheric loss: MHD prediction and comparison with MAVEN[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2017, 122: 4117-4137.
- Flynn CL, Vogt MF, Withers P, et al. MAVEN Observations of the Effects of Crustal Magnetic Fields on Electron Density and Temperature in the Martian Dayside Ionosphere[J]. Geophysical Research Letters: 2017, 44: 10,812-810,821.
- Fränz M, Dubinin E, Nielsen E, et al. Transterminator ion flow in the Martian ionosphere[J]. Planetary and Space Science: 2010, 58: 1442-1454.
- Fränz M, Winningham JD, Dubinin E, et al. Plasma intrusion above Mars crustal fields—Mars Express ASPERA-3 observations[J]. Icarus: 2006, 182: 406-412.
- Futaana Y, Barabash S, Yamauchi M, et al. Mars Express and Venus Express multi-point observations of geoeffective solar flare events in December: 2006[J]. Planetary and Space Science: 2008, 56: 873-880.
- Girazian Z, Mahaffy PR, Lillis RJ, et al. Nightside ionosphere of Mars: Composition, vertical structure, and variability[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2017, 122: 4712-4725.
- Gurnett DA, Kirchner DL, Huff RL, et al. Radar Soundings of the Ionosphere of Mars[J]. Science: 2005, 310: 1929-1933.
- Halekas JS, Brain DA, Luhmann JG, et al. Flows, Fields, and Forces in the Mars-Solar Wind Interaction[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2017, 122: 11,320-311,341.
- Halekas JS, Taylor ER, Dalton G, et al. The Solar Wind Ion Analyzer for MAVEN[J]. Space Science Reviews: 2015, 195: 125-151.
- Hara T, Luhmann JG, Leblanc F, et al. Evidence for Crustal Magnetic Field Control of Ions Precipitating Into the Upper Atmosphere of Mars[J]. Journal of Geophysical

Research: Space Physics: 2018, 123: 8572-8586.

- Harada Y, Halekas JS, Dibraccio GA, et al. Magnetic Reconnection on Dayside Crustal Magnetic Fields at Mars: MAVEN Observations[J]. Geophysical Research Letters: 2018, 45: 4550-4558.
- Harada Y, Halekas JS, Mcfadden JP, et al. Marsward and tailward ions in the near-Mars magnetotail: MAVEN observations[J]. Geophysical Research Letters: 2015, 42: 8925-8932.
- Harnett EM, Winglee RM. The influence of a mini-magnetopause on the magnetic pileup boundary at Mars[J]. Geophysical Research Letters: 2003, 30.
- Harnett EM, Winglee RM. High-resolution multifluid simulations of the plasma environment near the Martian magnetic anomalies[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2007, 112.
- Jakosky BM, Brain D, Chaffin M, et al. Loss of the Martian atmosphere to space: Present-day loss rates determined from MAVEN observations and integrated loss through time[J]. Icarus: 2018, 315: 146-157.
- Jakosky BM, Grebowsky JM, Luhmann JG, et al. MAVEN observations of the response of Mars to an interplanetary coronal mass ejection[J]. Science: 2015, 350.
- Jakosky BM, Jones JH. The history of Martian volatiles[J]. Reviews of Geophysics: 1997, 35: 1-16.
- Jakosky BM, Lin RP, Grebowsky JM, et al. The Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) Mission[J]. Space Science Reviews: 2015, 195: 3-48.
- Jarvinen R, Brain DA, Luhmann JG. Dynamics of planetary ions in the induced magnetospheres of Venus and Mars[J]. Planetary and Space Science: 2016, 127: 1-14.
- Krymskii AM, Breus TK, Ness NF, et al. Effect of crustal magnetic fields on the near terminator ionosphere at Mars: Comparison of in situ magnetic field measurements with the data of radio science experiments on board Mars Global Surveyor[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2003, 108.
- Kulikov YN, Lammer H, Lichtenegger HIM, et al. A Comparative Study of the Influence of the Active Young Sun on the Early Atmospheres of Earth, Venus, and Mars[J]. Space Science Reviews: 2007, 129: 207-243.
- Lammer H, Bredehöft JH, Coustenis A, et al. What makes a planet habitable?[J]. The Astronomy and Astrophysics Review: 2009, 17: 181-249.

- Lammer H, Kasting JF, Chassefière E, et al. Atmospheric Escape and Evolution of Terrestrial Planets and Satellites[J]. Space Science Reviews: 2008, 139: 399-436.
- Lammer H, Zerkle AL, Gebauer S, et al. Origin and evolution of the atmospheres of early Venus, Earth and Mars[J]. The Astronomy and Astrophysics Review: 2018, 26.
- Langlais B, Lesur V, Purucker ME, et al. Crustal Magnetic Fields of Terrestrial Planets[J]. Space Science Reviews: 2010, 152: 223-249.
- Leblanc F, Martinez A, Chaufray JY, et al. On Mars's Atmospheric Sputtering After MAVEN's First Martian Year of Measurements[J]. Geophysical Research Letters: 2018, 45: 4685-4691.
- Lillis RJ, Brain DA, Bougher SW, et al. Characterizing Atmospheric Escape from Mars Today and Through Time, with MAVEN[J]. Space Science Reviews: 2015, 195: 357-422.
- Lillis RJ, Brain DA, England SL, et al. Total electron content in the Mars ionosphere: Temporal studies and dependence on solar EUV flux[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2010, 115.
- Lillis RJ, Frey HV, Manga M. Rapid decrease in Martian crustal magnetization in the Noachian era: Implications for the dynamo and climate of early Mars[J]. Geophysical Research Letters: 2008, 35.
- Lillis RJ, Halekas JS, Fillingim MO, et al. Field-Aligned Electrostatic Potentials Above the Martian Exobase From MGS Electron Reflectometry: Structure and Variability[J]. Journal of Geophysical Research: Planets: 2018, 123: 67-92.
- Luhmann JG. The Solar Wind Interaction with Venus and Mars: Cometary Analogies and Contrasts[J]. Cometary Plasma Processes: 1991.
- Luhmann JG, Kozyra JU. Dayside pickup oxygen ion precipitation at Venus and Mars: Spatial distributions, energy deposition and consequences[J]. Journal of Geophysical Research: 1991, 96: 5457.
- Luhmann JG, Russell CT, Brace LH, et al. The intrinsic magnetic field and solar-wind interaction of Mars[C]//,1992:1090-1134.
- Lundin R, Barabash S, Holmström M, et al. Solar cycle effects on the ion escape from Mars[J]. Geophysical Research Letters: 2013, 40: 6028-6032.
- Lundin R, Barabash S, Yamauchi M, et al. On the relation between plasma escape and the Martian crustal magnetic field[J]. Geophysical Research Letters: 2011, 38.

- Lundin R, Dubinin EM. Phobos-2 results on the ionospheric plasma escape from Mars[J]. Advances in Space Research: 1992, 12: 255-263.
- Lundin R, Lammer H, Ribas I. Planetary Magnetic Fields and Solar Forcing: Implications for Atmospheric Evolution[J]. Space Science Reviews: 2007, 129: 245-278.
- Lundin R, Winningham D, Barabash S, et al. Plasma Acceleration Above Martian Magnetic Anomalies[J]. Science: 2006, 311: 980.
- Lundin R, Zakharov A, Pellinen R, et al. First measurements of the ionospheric plasma escape from Mars[J]. Nature: 1989, 341: 609-612.
- Ma Y-J, Nagy AF. Ion escape fluxes from Mars[J]. Geophysical Research Letters: 2007, 34.
- Ma Y, Fang X, Russell CT, et al. Effects of crustal field rotation on the solar wind plasma interaction with Mars[J]. Geophysical Research Letters: 2014, 41: 6563-6569.
- Ma Y, Nagy AF, Hansen KC, et al. Three-dimensional multispecies MHD studies of the solar wind interaction with Mars in the presence of crustal fields[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2002, 107: SMP 6-1-SMP 6-7.
- Ma Y, Nagy AF, Sokolov IV, et al. Three-dimensional, multispecies, high spatial resolution MHD studies of the solar wind interaction with Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2004, 109.
- Ma Y, Russell CT, Nagy A, et al. Understanding the Solar Wind–Mars Interaction with Global Magnetohydrodynamic Modeling[J]. Computing in Science & Engineering: 2017, 19: 6-17.
- Ma YJ, Dong CF, Toth G, et al. Importance of Ambipolar Electric Field in Driving Ion Loss From Mars: Results From a Multifluid MHD Model With the Electron Pressure Equation Included[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2019, 124: 9040-9057.
- Ma YJ, Russell CT, Fang X, et al. MHD model results of solar wind interaction with Mars and comparison with MAVEN plasma observations[J]. Geophysical Research Letters: 2015, 42: 9113-9120.
- Matsunaga K, Seki K, Brain DA, et al. Statistical Study of Relations Between the Induced Magnetosphere, Ion Composition, and Pressure Balance Boundaries Around Mars Based On MAVEN Observations[J]. Journal of Geophysical

Research: Space Physics: 2017, 122: 9723-9737.

- Matta M, Mendillo M, Withers P, et al. Interpreting Mars ionospheric anomalies over crustal magnetic field regions using a 2-D ionospheric model[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2015, 120: 766-777.
- Mcelroy MB, Kong TY, Yung YL. Photochemistry and evolution of Mars' atmosphere: A Viking perspective[J]. Journal of Geophysical Research (1896-1977): 1977, 82: 4379-4388.
- Mcfadden JP, Kortmann O, Curtis D, et al. MAVEN SupraThermal and Thermal Ion Compostion (STATIC) Instrument[J]. Space Science Reviews: 2015, 195: 199-256.
- Mitchell DL, Lin RP, Mazelle C, et al. Probing Mars' crustal magnetic field and ionosphere with the MGS Electron Reflectometer[J]. Journal of Geophysical Research: Planets: 2001, 106: 23419-23427.
- Moore KR, Thomas VA, Mccomas DJ. Global hybrid simulation of the solar wind interaction with the dayside of Venus[J]. Journal of Geophysical Research: 1991, 96: 7779.
- Moore TE, Horwitz JL. Stellar ablation of planetary atmospheres[J]. Reviews of Geophysics: 2007, 45.
- Moore TE, Peterson WK, Russell CT, et al. Ionospheric mass ejection in response to a CME[J]. Geophysical Research Letters: 1999, 26: 2339-2342.
- Morschhauser A, Spohn T. A Model of the Crustal Magnetic Field of Mars[C]. Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2016.
- Nagy AF, Winterhalter D, Sauer K, et al. The plasma Environment of Mars[J]. Space Science Reviews: 2004, 111: 33-114.
- Najib D, Nagy AF, Tóth G, et al. Three-dimensional, multifluid, high spatial resolution MHD model studies of the solar wind interaction with Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2011, 116.
- Ness NF, Acuña MH, Connerney JEP, et al. Effects of magnetic anomalies discovered at Mars on the structure of the Martian ionosphere and solar wind interaction as follows from radio occultation experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2000, 105: 15991-16004.
- Nier AO, Mcelroy MB. Structure of the Neutral Upper Atmosphere of Mars: Results from Viking 1 and Viking 2[J]. Science: 1976, 194: 1298.

- Nilsson H, Carlsson E, Brain DA, et al. Ion escape from Mars as a function of solar wind conditions: A statistical study[J]. Icarus: 2010, 206: 40-49.
- Nilsson H, Carlsson E, Gunell H, et al. Investigation of the Influence of Magnetic Anomalies on Ion Distributions at Mars[J]. Space Science Reviews: 2006, 126: 355-372.
- Nilsson H, Edberg NJT, Stenberg G, et al. Heavy ion escape from Mars, influence from solar wind conditions and crustal magnetic fields[J]. Icarus: 2011, 215: 475-484.
- Nilsson H, Stenberg G, Futaana Y, et al. Ion distributions in the vicinity of Mars: Signatures of heating and acceleration processes[J]. Earth, Planets and Space: 2012, 64: 9.
- Pérez-De-Tejada H. Plasma flow in the Mars magnetosphere[J]. Journal of Geophysical Research: 1987, 92: 4713.
- Pätzold M, Häusler B, Tyler GL, et al. Mars Express 10 years at Mars: Observations by the Mars Express Radio Science Experiment (MaRS)[J]. Planetary and Space Science: 2016, 127: 44-90.
- Phillips RJ, Zuber MT, Solomon SC, et al. Ancient Geodynamics and Global-Scale Hydrology on Mars[J]. Science: 2001, 291: 2587.
- Pizzo V. A three-dimensional model of corotating streams in the solar wind, 1. Theoretical foundations[J]. Journal of Geophysical Research: 1978, 83: 5563.
- Poulsen CJ, Tabor C, White JD. Long-term climate forcing by atmospheric oxygen concentrations[J]. Science: 2015, 348: 1238.
- Purucker M, Ravat D, Frey H, et al. An altitude-normalized magnetic map of Mars and its interpretation[J]. Geophysical Research Letters: 2000, 27: 2449-2452.
- Ramstad R, Barabash S, Futaana Y, et al. Effects of the crustal magnetic fields on the Martian atmospheric ion escape rate[J]. Geophysical Research Letters: 2016, 43: 10,574-510,579.
- Ramstad R, Barabash S, Futaana Y, et al. Ion Escape From Mars Through Time: An Extrapolation of Atmospheric Loss Based on 10 Years of Mars Express Measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Planets: 2018, 123: 3051-3060.
- Ramstad R, Barabash S, Futaana Y, et al. Mars Under Primordial Solar Wind Conditions: Mars Express Observations of the Strongest CME Detected at Mars

Under Solar Cycle #24 and its Impact on Atmospheric Ion Escape[J]. Geophysical Research Letters: 2017, 44: 10,805-810,811.

- Regoli LH, Dong C, Ma Y, et al. Multispecies and Multifluid MHD Approaches for the Study of Ionospheric Escape at Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2018, 123: 7370-7383.
- Romanelli N, Modolo R, Leblanc F, et al. Effects of the Crustal Magnetic Fields and Changes in the IMF Orientation on the Magnetosphere of Mars: MAVEN Observations and LatHyS Results[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2018, 123: 5315-5333.
- Rosenbauer H, Shutte N, Apáthy I, et al. Ions of martian origin and plasma sheet in the martian magnetosphere: initial results of the TAUS experiment[J]. Nature: 1989, 341: 612-614.
- Russell CT, Luhmann JG, Schwingenschuh K, et al. Upstream waves at Mars: Phobos observations[J]. Geophysical Research Letters: 1990, 17: 897-900.
- Russell CT, Luhmann JG, Strangeway RJ. The solar wind interaction with Venus through the eyes of the Pioneer Venus Orbiter[J]. Planetary and Space Science: 2006, 54: 1482-1495.
- Seki K, Elphic RC, Hirahara M, et al. On Atmospheric Loss of Oxygen Ions from Earth Through Magnetospheric Processes[J]. Science: 2001, 291: 1939-1941.
- Strangeway RJ, Russell CT, Luhmann JG, et al. Does a Planetary-Scale Magnetic Field Enhance or Inhibit Ionospheric Plasma Outflows?[J]. AGU Fall Meeting Abstracts: 2010,: 2010: SM33B-1893.
- Vaisberg OL, Luhmann JG, Russell CT. Plasma observations of the solar wind interaction with Mars[J]. Journal of Geophysical Research: 1990, 95: 14841.
- Vignes D, Acuña MH, Connerney JEP, et al. Magnetic Flux Ropes in the Martian Atmosphere: Global Characteristics[J]. Space Science Reviews: 2004, 111: 223-231.
- Weber T, Brain D, Mitchell D, et al. The Influence of Solar Wind Pressure on Martian Crustal Magnetic Field Topology[J]. Geophysical Research Letters: 2019, 46: 2347-2354.
- Wei Y, Fraenz M, Dubinin E, et al. Ablation of Venusian oxygen ions by unshocked solar wind[J]. Science Bulletin: 2017, 62: 1669-1672.
- Wei Y, Fraenz M, Dubinin E, et al. Enhanced atmospheric oxygen outflow on Earth 108

and Mars driven by a corotating interaction region[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2012, 117.

- Wei Y, Pu Z, Zong Q, et al. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction[J]. Earth and Planetary Science Letters: 2014, 394: 94-98.
- Withers P, Flynn CL, Vogt MF, et al. Mars's Dayside Upper Ionospheric Composition Is Affected by Magnetic Field Conditions[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2019, 124: 3100-3109.
- Withers P, Mendillo M, Rishbeth H, et al. Ionospheric characteristics above Martian crustal magnetic anomalies[J]. Geophysical Research Letters: 2005, 32.
- Wu XS, Cui J, Xu SS, et al. The Morphology of the Topside Martian Ionosphere: Implications on Bulk Ion Flow[J]. Journal of Geophysical Research: Planets: 2019, 124: 734-751.
- Xu S, Mitchell D, Liemohn M, et al. Martian low-altitude magnetic topology deduced from MAVEN/SWEA observations[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2017, 122: 1831-1852.
- Xu S, Mitchell DL, Mcfadden JP, et al. Field-Aligned Potentials at Mars From MAVEN Observations[J]. Geophysical Research Letters: 2018, 45: 10,119-110,127.
- Xu S, Mitchell DL, Weber T, et al. Characterizing Mars's Magnetotail Topology With Respect to the Upstream Interplanetary Magnetic Fields[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics 2020, 125: e2019JA027755.

#### 致 谢

致谢的篇首,献给尊敬的万卫星院士。

在三个月前的一个雨夜,万老师永远的离开了我们。还记得,四年前刚在雁 栖湖完成国科大集中教学、返回研究所的我,恬不知耻的在万老师面前大肆吹嘘 火星沙尘暴对电离层的影响;万老师听完饶有兴致地鼓励我说,这个有意思。万 老师仁和宽厚的性格和他对火星科学的不懈探索是我心中的楷模。

在就读博士的这五年间,我的人生阅历和科研经历都得到了极大的丰富。为 此,我要感谢我的导师——魏勇研究员。从大学到雁栖湖,从北京到哥廷根,我 能勉强完成学业,离不开魏老师的悉心教导和支持。每当我产生了稀奇古怪的想 法,魏老师都认真地帮我梳理思路,去粗取精;每次跟魏老师讨论问题,魏老师 都耐心地等我不再疑问,兴尽而归。至今仍清楚地记得三年前,魏老师为了让我 人生中的第一次学术报告不至于太过难堪,耐心的听我讲了一遍又一遍……这些 殷殷爱护之情,溢于言表。魏老师充满热情的鼓励,是我在科研道路上不断前行 的最大动力。

感谢中山大学崔峻教授。这些年承蒙崔老师错爱,不胜感激。从雁栖湖校园 到中山大学珠海校区,崔老师对我的帮助不胜枚举。就在两个月前的一个深夜, 崔老师百忙之中还在帮我逐字逐句的批改论文,并耐心的提出润色文章的改进方 案,这份厚爱让我既感动又惭愧。

感谢空间中心孔令高研究员。有幸得到孔老师的抬爱,让我在学生时期就能 够接触到中国"天问一号"火星探测器中离子中性分析仪的相关知识,大大加深 了我对仪器工作原理方面的理解,孔老师的耐心与包容让我获益匪浅。

感谢研究室刘立波研究员,刘老师不仅授课认真,内容详实,还亲自带我们 去漠河台站参观实习,这次经历对于从来没有接触过电离层探测的我来说真的是 大开眼界。刘老师组织的读书报告,为学生们之间的学术交流提供了非常宝贵的 机会。

在中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室学习期间, 课题组内,老师们对我给予了很多帮助和建议,我非常感谢他们:

感谢戎昭金副研究员,从四年前我刚刚进课题组到现在邻近毕业,我的每一

项工作:不论是已发表、还是未发表以及待发表的工作, 戎老师都给予了许多热心的帮助和建议, 我深表感激。在此, 对戎老师乐于助人的精神和对待工作认真 负责态度致以崇高的敬意。

感谢柴立晖副研究员,柴老师真诚直率、平易近人。刚回研究所时,柴老师 带我熟悉程序和软件,是我后来研究工作得以开展的基础。我因编程疏忽导致的 结果上的谬误,柴老师也总是可以及时得指出。平时生活中以及学术会议期间, 柴老师也对我给予了很多关心和帮助,我记忆犹新、由衷感谢。

另外,感谢尧中华研究员、钟俊副研究员、何飞副研究员在组会上耐心的讲 解,以及在我论文初次被拒时给予我的安慰和鼓励。同样感谢孙为杰博士、郭瑞 龙博士、李坤副教授、闫丽梅副研究员、韩秀红博士在我进入课题组时给予我的 关心和帮助。

感谢德国马普太阳系研究所 Markus Fraenz 教授。工作时, Fraenz 教授严谨 专注,容不得一丝疏忽;生活里, Markus 开朗幽默, EPSC 会议期间在日内瓦湖 畔的夜谈,将是我毕生难忘的回忆。Fraenz 教授不仅是德高望重的学术界典范, 也是智慧的长者,对我关爱有加,是我在德国求学期间的良师益友。

同样感谢德国马普太阳系研究所的 Eduard Dubinin 教授, Lukas Maes 博士以 及整个 Plasma Group,不论是组会报告还是工作建议我都获益良多。在德期间同 样受到了国内同道的不少照拂,对他们非常感激,他们是:马普太阳系研究所朱 小帅博士、余杰博士、杨丹博士;南京大学程鑫副教授;空间中心胡会东博士; 山东大学威海分校侯振永博士;北京师范大学张敬华博士;北京大学孙翌馨、陈 亚杰。

特别的感谢还要送给张辉研究员、乐新安研究员、赵必强研究员、任志鹏研 究员、葛亚松研究员、陈一定研究员、乐会军研究员和袁憧憬副研究员以及波士 顿大学 Majd Mayyasi 博士和马普太阳系研究所 Sebastian Hoefner。

求学这五年间,同窗好友、师兄师姐和师弟师妹们都对我的学习和生活提供 过各种意义上的帮助,十分感激,他们是:韩倩倩、丁源、覃鹏飞、李巧玲、李 博、王磊、周旭、李佳成、杨长俊、于婷婷、王开天、李傲、王琳、周晓得、李 睿、胡迪、许黄涛、胡换龙、陈沛文、白一鸣、马振军、刘文才、刘迪、高佳维、 蔡毅辉、陈思、徐凯华、刘耘博、肖寒、张弛、石振、李欣舟等。另外,感谢国

家天文台的曹雨田博士,每次与他讨论都能收获很多知识,产生很多想法。如果 没有以上老师和同学们的无私援助,这篇论文无法顺利诞生。

感谢魏勇老师悉心预审全文;感谢陈思同学帮我进行文章校对。

还要感谢我最亲爱的父母,没有他们对我的包容和体谅、理解和支持,我就 无法自由的追逐我的梦想和兴趣,更无法完成我的学业。这些年来,你们只要求 我"无愧于心",仔细想想,我做得不够好,未来的日子,儿子继续努力。

范开

2020年8月于北京

# 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

2011年09月——2015年06月,在中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院获得地球物理学士学位。

2015年09月——2020年08月,在中国科学院地质与地球物理研究所(中国科学院大学地球与行星科学院系)攻读空间物理学博士学位。

获奖情况:

第十届全国空间天气学研讨会"优秀青年论文奖",中国地球物理学会空间 天气专业委员会,2016。

2017-2018 学年,中国科学院大学 "三好学生"。
2018-2019 学年,中国科学院大学 "三好学生"。
2018-2019 学年,中国科学院大学国家奖学金
2019-2020 学年,中国科学院大学 "三好学生标兵"。

学术会议经历:

2016.10.18-20, 行星大气与空间环境研讨会(澳门), 口头报告。

2016.11.06-09,第十次空间天气学研讨会(武汉),展板报告。

2017.05.15-18, International Conference on Mars Aeronomy (Boulder, USA), Oral.

2017.05.31-06.02,"首次火星探测任务有效载荷探测技术和数据处理"学术研讨会(珠海)。

2017.08.01-03, 第四届全球华人空间天气科学大会(北京), 口头报告。

2017.10.15-18,中国地球科学联合学术年会(北京),展板报告。

2018.09.16-21, European Planetary Science Congress (Berlin, Germany), Poster.

2018.10.15-19, The Mars Upper Atmospheric Network Meeting (Nicosia,

Cyprus), Oral.

2019.04.07-12, EGU General Assembly (Vienna, Austria), Poster.

2019.10.16-21, EPSC-DPS Joint Meeting (Geneva, Switzerland), Poster.

已发表(或正式接受)的学术论文:

- Fan, K., Fraenz, M., Wei, Y., Han, Q., Dubinin, E., Cui, J., Chai, LH., Rong ZJ., Zhong J., Wan, WX., Mcfadden, J., Connerney, JEP. Reduced atmospheric ion escape above Martian crustal magnetic fields[J]. Geophysical Research Letters: 2019, 46. https://doi.org/10.1029/2019GL084729.
- Fan, K., Fraenz, M., Wei, Y., Cui, J., Rong ZJ., Chai, LH., Dubinin, E. Deflection of Global Ion Flow by the Martian Crustal Magnetic Fields[J]. The Astrophysical Journal Letters: 2020, 898: L54. https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba519.
- Han, Q., Fan, K., Cui, J., Wei, Y., Fraenz, M., Dubinin, E., Chai, LH., Rong ZJ., Zhong J., Wan, WX., Andersson, L., Mitchell, DL., Connerney, JEP. The relationship between photoelectron boundary and steep electron density gradient on Mars: MAVEN observations[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics: 2019, 124. https://doi.org/10.1029/2019JA026739.
- Wu, XS., Cui, J., Xu, SS., Lillis, RJ., Yelle, RV., Edberg, NJT., Vigren, E.; Rong, ZJ.,
  Fan, K.; Guo, JP.; Cao, YT.; Jiang, FY.; Wei, Y.; Mitchell, DL. The morphology of the topside Martian ionosphere: Implications on bulk ion flow[J]. Journal of Geophysical Research: Planets: 2018, 124, 734-751.
  https://doi.org/10.1029/2018JE005895