



探索中前行——中国空间物理研究70年

傅绥燕^{1*}, 徐寄遥², 魏勇³, 刘立波³, 熊明², 曹晋滨⁴, 宗秋刚¹, 王赤², 冯学尚²,
史全岐⁵, 师立勤², 任丽文²

1. 北京大学地球和空间科学学院, 北京 100871;

2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

4. 北京航空航天大学空间与环境学院, 北京 100191;

5. 山东大学(威海)空间科学与物理学院, 威海 264209

* E-mail: suiyanfu@pku.edu.cn

收稿日期: 2019-06-13; 收修改稿日期: 2019-08-10; 接受日期: 2019-08-23; 网络版发表日期: 2019-09-12

摘要 空间物理学是一门探测与理论并重的学科. 探测广袤的空间环境倚赖地基和卫星技术, 研究深邃的空间物理过程需由各国研究团体通力合作. 中国空间物理研究的70年发展, 也体现在国家综合科技实力和国际影响力的上升路径之中. 从建国前的零星研究起步, 到改革开放前的规模初现, 再到20世纪末的全面爆发, 中国空间物理在自主探测与理论研究两方面都实现了阶跃式发展. 进入21世纪以来, 随着综合国力的再一次快速提升, 中国空间物理研究在国际范围内呈现出“多数并跑, 部分引领”的新局面. 得益于深空探测国家战略的确立, 研究领域也从地球空间延拓至行星空间甚至更广. 中国空间物理研究的70年, 不断探索, 不断前行, 各领域人才辈出, 队伍不断成长壮大, 从依赖外国探测数据到自主研究发展, 从西学东归到人员对流, 走出了不断进步的发展历程. 未来的空间物理研究, 将仍然与国家富强民族复兴紧密相连, 在引领学科发展潮流中探索, 在服务国家战略需求中前行.

关键词 日地空间物理, 行星际, 磁层, 电离层, 中高层大气, 行星空间物理

1 建国之前的历史

20世纪30~40年代, 国际上空间物理学尚未形成, 但高空大气物理(Aeronomy)等相关学科已是一派欣欣向荣, 此时中国的相关研究也开始孕育. 国立北平研究院物理研究所严济慈和钟盛标率先开展了大气光谱研究, 测定了215~345nm紫外吸收区域的吸收系数, 于

1933年被国际臭氧委员会认定为标准值. 这是中国物理学家的研究工作首次得到国际学界认可, 也是中国空间物理学的萌芽. 1934年, 熊子敬首先对宇宙射线的微粒性假说做了符合验证, 开启了中国宇宙线物理研究. 中国电离层研究也在同一时期起步. 1935年, 中央研究院物理研究所陈茂康等设计了一套单频的高频探测仪, 在上海进行了电离层观测; 其后又将这套仪器

中文引用格式: 傅绥燕, 徐寄遥, 魏勇, 刘立波, 熊明, 曹晋滨, 宗秋刚, 王赤, 冯学尚, 史全岐, 师立勤, 任丽文. 2019. 探索中前行——中国空间物理研究70年. 中国科学: 地球科学, 49, doi: [10.1360/SSTe-2019-0131](https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0131)

英文引用格式: Fu S, Xu J, Wei Y, Liu L, Xiong M, Cao J, Zong Q, Wang C, Feng X, Shi Q, Shi L, Ren L. 2019. Seventy years of space physics research in China (in Chinese). *Scientia Sinica Terrae*, <https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0131>

发展成为可变频的手动测高仪, 并对1936年上海日偏食和1941年福建日全食期间的电离层进行了观测. 桂质廷在湖北武昌利用脉冲垂测仪, 于1937~1938年进行了近9个月的定时观测, 这是中国最早的较为系统连续的电离层观测. 1946年, 桂质廷在武汉大学建立了游离层实验室. 1947年, 武汉大学梁百先在《自然》杂志发文, 独立发现了“电离层赤道异常现象”, 得到了诺贝尔物理学奖得主Appleton的认可.

2 建国后至改革开放前

1957年, 苏联成功发射了第一颗人造地球卫星, 从此人类进入了太空时代, 也催生出空间物理学这一新兴学科. 1958年, 中国科学家钱学森、赵九章等提出研制人造卫星的建议, 得到了中央的批准, 中国科学院成立“581”组开启了中国人造卫星事业, 形成了比较完整的卫星总体、火箭探测总体和空间探测分系统研究实体, 并开始研制人造卫星. 1960年卫星总体研究室成立, 开展星上和地面相关技术研究. 从1959年到1966年, 赵九章领导的研究人员首次利用火箭探测获得中层大气和电离层数据.

在中国为发射人造地球卫星进行探索准备时期, 中国地球物理学家首先利用实验室模拟和地面探测手段开展了磁层物理的探测研究. 1963年底中国第一个空间环境模拟实验室建成, 赵九章、徐荣兰、周国成开始对带电粒子在地磁场中的运动规律进行研究, 开展了卫星轨道空间辐射环境的分析预测和太阳活动预报, 发表了中国在这一领域的首批研究成果(赵九章等, 1963). 20世纪60年代初, 赵九章领导成立磁暴理论研究组, 成员包括刘振兴、章公亮、徐荣兰、都亨、濮祖蔭、傅竹风等, 开展有关磁层的学术活动(刘振兴和濮祖蔭, 1964).

1970年4月24日“东方红一号”卫星成功发射, 1971年3月3日“实践”系列科学探测与技术试验卫星中的“实践一号”成功发射, 从此空间物理学各分支学科的研究工作全面起步.

3 1979~1999主要研究活动及成果

日地空间系统由太阳大气、行星际空间、地球空间三部分构成. 地球空间是固体地球及地球大气层的

自然延伸, 包含地球大气层以外、地球磁场所能达到的广大区域, 由中层大气、电离层和磁层等圈层组成. 日地空间物理的核心问题是能量如何从太阳表面爆发, 通过行星际空间到达地球磁层, 并在磁层与电离层、中高层大气中传输和耗散.

20世纪70年代, 王水和方励之(1979)对行星际磁场的扇形结构开展研究, 指出这种结构可能是由赤道面上的大尺度涡旋波引起的. 80年代中期, 章公亮的研究团队开始研究太阳耀斑引起的日球扰动、地磁扰动以及行星际共转似稳结构、日冕物质抛射事件等(章公亮, 1984). Wei和Dryer(1991)通过分析行星际闪烁IPS射电望远镜的长期观测数据, 提出行星际激波扰动在传播中会向日球层电流片方向偏转和会聚.

80年代末, 在太阳风研究领域Tu(1988)创建了“类WKB湍流理论”, 提出太阳风加热的能源来自湍流串级能量, 统一了对于阿尔芬脉动的波动描述与湍流描述之间的矛盾, 解释了Helios飞船观测到的太阳风非绝热膨胀的现象, 揭示了太阳风中阿尔芬脉动的本质, 促进了国际学术界对太阳风湍流传输理论的研究. 后期提出阿尔芬波扫频耗散对太阳风源区的加热机制, 成为太阳风起源波动供能的主流模型之一(Tu和Marsch, 1997).

与此同时, 在磁层研究领域, 中国磁层物理学家开始了磁重联研究. 傅竹风等提出了磁层顶通量传输事件的“多X-线重联”模型, 成为主流模型之一(Lee和Fu, 1985). Liu和Hu(1988)提出的“涡旋诱发磁重联”模型来解释通量传输事件的成因. Pu和Kivelson(1983)还建立了无碰撞空间等离子体中的K-H不稳定性理论, 论证了太阳风通过K-H不稳定波向磁层传输能量和动量并激发低频磁层脉动的机制. Pu等(1997)还发现在近磁尾存在两支气球模不稳定性, 并在此基础上提出了一个磁层亚暴触发的全球模型. 在内磁层研究方面, Xu(1991)建立了一个能够描述磁尾及其中性片随地球磁偶极子倾角变化的磁尾中性片模式, 并被编入美国宇航局国家数据资料中心.

在电离层理论研究方面, 80年代初期, 李钧等人研究了电离层电波传播的等效屏理论及二次回波特性, 并发展电离层漂移测量的相似衰落分析方法(李钧, 1983; 万卫星和李钧, 1987). 黄信榆和谭子勋(1984)研究了速度分布对A-H公式的影响, 并提出了电离剖面反演的新算法. 90年代中后期, Wan等(1998)基于对高

频多普勒观测资料的分析,发现中国电离层中尺度行进式扰动主要有东北、东南两种优势传播方向,其起源与青藏高原的地形隆起有关.

1993年底,中国空间物理学界经多年酝酿联合提出“东半球空间环境地基综合监测子午链”的科学构想,经几代科技工作者的不断努力,终于在2012年完成工程建设.该科学工程利用沿120°E子午线和30°N纬线附近的15个综合性观测台站,综合运用包括无线电、地磁、光学和探空火箭等在内的多种探测手段,连续监测地球表面20~30km以上直到几百公里的中高层大气层、电离层和磁层,以及十几个地球半径以外的行星际空间环境参数,能够提供完整、连续、可靠的空间环境地基综合监测数据.

随着国际空间探测的发展,中国空间物理学家们在1997年初提出了“地球空间双星探测计划”,并且分别于2003年12月和2004年7月成功发射两颗科学卫星.这是中国第一个以科学目标为牵引立项的先进的卫星探测计划,计划针对地球磁层空间暴及其整体动态活动特征,与欧空局的CLUSTER卫星星座计划相互配合,实现地球空间“六点”协同观测.

4 新世纪20年来探测与研究的主要进展

4.1 探测能力的提升

空间物理学是建立在探测基础上的一门科学,探测技术与能力的水平,在很大程度上制约研究的水平.中国在20世纪虽然也开展了一些有关探测活动,但规模和影响力都较小.20世纪末,中国科学家提出了两项重大科学探测计划,即“地球空间双星探测计划”(双星计划)(刘振兴, 2001, 张永维等, 2008)与“东半球空间环境地基综合监测子午链”(子午工程)(中国空间物理学学科发展战略研究组, 1996; Wang, 2010).进入21世纪后,这两项科学探测计划得以成功实施,推动了巨大的技术进步,成为国际上重大空间探测计划的重要组成部分,相应的科学研究也大幅提升了中国在国际空间科学领域的地位与影响力.

近20年来,中国电离层探测技术有了长足进步,一些重要的探测仪器从无到有,从主要依靠进口,到自主研发,并达到国际先进水平,多种地基仪器实行了台链式和网络式观测站布局及实时连续监测分析.适合流动组网观测的PDI敏捷数字电离层测高仪,实现了电

离层快速扰动(周期为几分钟)的高精度测量(Lan等, 2018).充分发挥北斗系统资源提供的中国独有的电离层观测优势,建成了一个采用经纬向链式布阵的电离层GNSS观测网,利用中国上空的多颗地球同步和准同步北斗卫星,开展电离层TEC、电离层闪烁的定点观测和增强观测,研究电离层中小尺度变化和不均匀体特性(Hu等, 2017).

地基雷达具有测量参数多、范围广、分辨率高、操作灵活、观测时间长等特点,广泛服务于中高层大气能量输运过程、低纬大气层电离层磁层耦合、电离层不均匀体等重要科学问题研究和卫星导航修正等应用需求.近10年以来,中国在电离层雷达技术和系统的研制应用上取得了迅猛发展.2009年首先在三亚建成了VHF电离层相干散射雷达,并升级为具有电离层相干散射和全天空流星探测的双模式雷达(Li等, 2013).随后,相继在海南富克、湖北武汉和云南曲靖建设了三台VHF电离层相干散射雷达,在南极中山站和佳木斯建设了两台HF电离层相干散射雷达,开展对电离层场向不均匀体的探测(Chen等, 2017).2012年,在子午工程的支持下,曲靖非相干散射雷达建成并投入运行,实现了电离层的非相干探测(Ding等, 2018).此外,在国家自然科学基金委重大科学仪器项目支持下的新一代固态数字相控阵三亚非相干散射雷达将在近期建成.非相干散射雷达技术突破和系统建成,将有力提升中国电离层探测技术,推动中国电离层科学研究的发展.

中间层和低热层区域气体稀薄,自由电子稀疏,导致各种遥感回波信号微弱,探测困难.以荧光共振激光雷达、全天空辉成像仪、流星雷达等为代表的光学和无线电观测技术的迅速发展和联网观测,使得我们对中间层顶和低热层有了更加深入的理解.中间层顶区域的“金属层”是由进入地球大气的流星烧蚀产生的金属原子或离子富集区.20世纪90年代初,龚顺生等研制成功中国首台钠激光雷达并用于钠层探测.在子午工程的支持下,中国沿120°E和30°N链,在北京、合肥、武汉、海口部署了4套瑞利-钠荧光共振激光雷达,用于开展相关探测.在对不同突发金属层共体观测中, Yi等(2007)发现突发铁层和突发钠层通常在相同高度上同时形成,具有相同的运动特征,暗示了铁和钠两种金属成分的同源演化过程;但突发钾层和突发钠层的季节变化、突发特征存在很大差异,这可能与

金属原子不同的化学特性有关(Jiao等, 2015)。基于荧光共振激光雷达的观测, Dou等(2013)发现了突发钠层与电离层突发E层在夏季相关性高, 而在其他季节中低纬度的突发钠层与电离层突发E层相关性并不高, 且存在显著的区域性特征。Xue等(2013)根据观测提出潮汐风场汇聚金属离子, 再通过化学中和是形成热层金属钠层的可能机制。此外, 激光雷达分别在低纬度和中纬度地区观测到超高高度(170~200km)的热层金属钠层, 证实了热层金属钠层存在百公里尺度空间不均匀性(Xun等, 2019), 揭示了中性热层大气与电离层E区和F区之间动力学和电动力学耦合关系。

低层大气扰动上传到中高层大气, 在不同大气圈层间相互耦合方面发挥重要作用。徐逍遥研究组研发并建立了国际上第一个OH和红光(630nm)双层全天空气辉探测台网, 利用华北地区OH无缝隙气辉观测台网, 给出了强烈雷暴产生的大气重力波在中层顶区域通过波导管可以在水平方向上千公里的大范围内(从山西到朝鲜半岛)传播的观测证据(Xu等, 2015), 揭示了波导在重力波长距离传播的重要作用。利用红光气辉观测网的观测, Wu等(2017)给出了台风产生的大气重力波诱发电离层波状结构等离子泡的观测证据。

极区是太阳风粒子和行星际磁场能量进入地球空间的入口, 也是地球磁层的投影区。在南北极科学考察、子午工程等项目的支持下, 于20世纪90年代中期开始, 中国先后在南极中山站(1995年)、北极黄河站(2003年)、北极朗伊尔(2010年)、北极中国-冰岛联合科学考察站(2013年)建成了包含光学观测、地磁监测和无线电探测的极区中高层大气地基综合观/监测系统(Liu和Yang, 2012), 系统研究了日侧分立极光, 发现日侧极光卵极隙区存在复杂的冕状极光形态(Yang等, 2000), 并定义了其中一种典型的极隙区极光——喉区极光(Han等, 2015)。

利用地基设备对行星际空间的探测在近年来也取得了重要的进步。行星际闪烁IPS探测是一种既经济又灵敏的行星际空间扰动的探测手段, 探测范围涵盖了5~200个太阳半径范围的行星际空间。中国在IPS探测方面始于20世纪90年代末, 主要利用国家天文台密云观测站的综合孔径射电望远镜阵开展了部分观测实验。2008年起, 开始利用密云50m射电望远镜和新疆25m口径射电望远镜进行IPS试观测, 初步建立单站单频的IPS观测系统, 尝试观测行星际太阳风速及闪烁指

数(Yan等, 2018)。

地球磁层以及之外的行星际空间的主要探测手段是利用卫星开展的天基探测。伴随着航天活动的开展, 中国天基探测有效载荷水平也在不断提高。中欧合作双星计划的实施过程中, 实现了空间磁场波动探测(Cao等, 2005)。尽管在双星科学探测卫星之后, 中国没有发射专门的空间科学探测卫星, 但利用各类资源、环境、气象以及新技术实验卫星搭载机会, 多种探测设备的水平也得到提高。搭载于嫦娥三号的极紫外相机, 利用地球等离子体层中的氦离子(He^+)共振散射的太阳30.4nm极紫外辐射进行全景成像, 以监视地球等离子体层的空间范围及其随太阳活动的动态变化, 从而实现对空间天气的监测。2013年12月实现了从侧面对等离子体层的全景成像, 并且利用He等(2011)建立的最小L反演算法成功重构了等离子体层的全球分布形态, 反演精度接近就位探测水平。通过对一次亚暴期间等离子体层全球演化的连续监测, 发现了亚暴期间等离子体层剥蚀的传播特征及其与极光卵动态变化的相关现象(He等, 2016)。宗秋刚和邹鸿领导的研制团队自主研发的成像电子谱仪(BD-IES), 具有空间、能量、时间分辨率高, 测量能量范围广等诸多优势, 搭载于倾斜同步轨道卫星上, 用于研究亚暴能量粒子注入、波粒相互作用机制、能量电子起源等多个磁层物理热点问题(Zong等, 2016; Zou等, 2018)。

4.2 数值模拟主要研究成果

太阳风暴的行星际过程把空间天气变化源头的输出信息与地球空间系统的空间天气最终的响应变化连接起来, 具有重要的桥梁和纽带作用。基于物理的以强大计算能力为基础的太阳风暴数值模拟为日地空间物理研究提供虚拟可控的仿真实验室, 用于研究太阳爆发活动和行星际扰动传播, 为空间天气数值预报提供定量分析工具。Feng等(2007)自主开发了日冕-行星际守恒元解元磁流体力学数值模式(CESE-MHD), 广泛应用于太阳活动区演化、太阳风准稳态背景、CME扰动传播等模拟研究。Jiang等(2013)利用太阳活动区的光球矢量磁图为驱动底边界, 重构太阳活动区的非势性磁场, 揭示日冕磁场的完整演化过程(包括磁零点处的磁场重联、背景日冕磁场的束缚减弱、磁通量绳向上膨胀、电流环不稳定性的触发)。Feng等(2012)利用光球磁场观测数据驱动的背景太阳风模型, 再现冕

流和冕洞等日冕全球结构及其演化趋势, 得到基本符合实际卫星就位观测的1AU处的太阳风密度、速度和磁场结构等参数变化特征. Shen等(2013)数值模拟两个CME之间的相互作用, 指出其接近速度、膨胀速度之和等因素对相互作用物理过程的类型具有显著的影响. Xiong等(2018)利用CESE-MHD数值模型, 正演合成“太阳探针(PSP)”和“太阳环绕器(SoIo)”卫星的白光成像观测, 分离并提取背景太阳风流的大尺度准稳态结构和瞬变CME的运动阵面等白光影像特征.

太阳风与磁层的相互作用是数值模拟研究的重要领域. Hu等(2007)和Wang等(2013a)建立和完善了全球三维太阳风-磁层耦合系统高精度数值模型(PPMLR-MHD), 其数值耗散比国际主流模型低1个数量级. 该模型被用来研究太阳风与磁层的耦合过程, 例如获得全新的能量耦合函数和开放磁通函数(Wang等, 2013b, 2014), 以及开闭磁力线边界位置随行星际磁场变化的定量关系(Wang C等, 2016)等等. 基于该模型和卫星观测数据, 研究发现弓激波能够对磁层持续供电, 表明太阳风可以通过场向电流直接与电离层耦合(Guo等, 2008; Tang等, 2012). 此外, Lu等(2011)提出了三维非对称磁层顶和弓激波模型, 发现太阳风和地球偶极倾角对磁层顶和弓激波位型的影响规律.

磁场重联是宇宙空间最有效的能量转换和释放机制, 也是等离子体物理的一个基本问题, 多种数值模拟方法被用来研究磁场重联触发机制以及相关波动和粒子加速问题. 胡友秋等设计了适应低 β 、高磁雷诺数条件下的多步隐格式, 用于求解二维三分量MHD物理问题(Hu, 1989). 该格式被大量用于磁重联、活动区磁结构、太阳风加速和太阳爆发等方面的数值模拟, 例如发展了波耗散机制驱动的一维和二维太阳风加速模型(Chen和Hu, 2001)和CME磁绳灾变数值模型(Hu等, 2003)等. Lu等(2010)利用自主的全粒子和混合模拟的粒子模拟方法, 发现磁场重联过程中电子可在多个区域被加速, 各区域具体加速机制受到背景磁拓扑结构的制约. 模拟发现重联扩散区可能存在许多小尺度的磁绳结构, 这些次级磁绳之间会相互合并, 使得磁场重联区域最终演化为湍动态(Wang R S等, 2016).

实验室模拟是国际上新兴的一种空间物理研究方法, 其具有参数可控、重复性、诊断精确等诸多优点. 中国空间物理工作者自主设计建设了多个空间等离子

体地面设备, 并开展了相关工作. 例如成功研制了电离层环境的空间等离子体实验装置(Liu等, 2016), 并开展了电离层低频剪切等离子体不稳定性 and 波动的激发过程研究, 揭示了电离层宽带超低频湍流的激发机制(Liu等, 2017); 空间环境地面模拟设施模拟装置(Xiao等, 2017)也经国家批准开始建设, 并开展了部分磁层太阳风等离子体实验模拟.

4.3 观测与理论研究的主要成果

在国家自然科学基金委、科技部等部门的支持下, 中国的空间物理学基础研究工作取得了一批重要研究成果, 在太阳风的起源及其加热和加速、行星际扰动传播、磁暴和亚暴的产生机制、磁重联过程、太阳风与磁层的相互作用、中高层大气动力学过程的探测与研究、电离层的建模以及空间天气预报方法研究等诸多国际研究前沿领域, 都已取得重要进展或突破.

4.3.1 太阳风暴的起源与传播

(1) 太阳风的起源与湍动过程. 太阳风起源于太阳向外膨胀的日冕, 包含具有不同的特性快慢两种太阳风. 不同类型太阳风的加速及加热问题一直以来都是日地物理的基本问题之一. Tu等(2005)分析了SOHO飞船对冕洞的光球磁场、过渡区光谱成像的观测资料, 发现太阳风起源于日冕漏斗状的开放磁结构, 物质和能量来源于对流驱动的磁重联. 高温高速的太阳风流经常伴随着强湍动/强波动, 湍动被认为是太阳风加热加速的重要能量来源. 太阳风湍动中也存在间歇性的结构, 包括旋转间断面、切向间断面以及其他类型的间断面, 对湍动功率谱的各向异性的形成至关重要. 基于对湍动可能出现的磁场螺度谱的预测, He等(2012)将磁螺度谱在离子尺度分解为准垂直成分和准平行成分, 通过理论模型, 重现了二元成分并定量分析两种成分的能量占比, 发现动力论阿尔芬波可占比80%, 借此回答高速太阳风湍动在离子尺度的本质问题. 对于慢速太阳风, 可压缩湍动的朗道耗散、磁重联的慢激波对、背靠背旋转间断面都有利于质子的平行加热(He等, 2018).

(2) 日冕物质抛射(CME)的结构及起源. 太阳日冕磁活动的不稳定性导致大量的日冕物质和磁通量被抛射至行星际空间, 是灾害性空间天气事件的最主要驱动源(王水等, 2000; 汪景琇和季海生, 2013). Cheng等

(2011)通过SDO/AIA多波段成像观测发现了CME中心的等离子体温度高达上千万度,其形态和演化特征与理论上预测的磁绳形态和演化特征几乎完全一致.磁云作为一种重要的CME类型,被行星际卫星的多点局地观测证实为一组磁力线绕着中心轴相互缠绕组成的磁通量绳. Wang Y等(2016)统计发现了行星际空间中大规模磁绳的总缠绕度的上限由两倍的磁绳的轴长和半径的比值决定,指出磁绳可以高度扭缠并且磁绳内圈可以缠得比外圈更紧.行星际扰动的复杂结构包括磁云边界层、多重磁云、激波穿越磁云等. Wei等(2003)提出磁云边界层的概念,并发现磁云边界层附近的磁场重联特征.多重磁云和激波-磁云这两类复杂结构都具有强的地磁暴效应(Wang Y M等, 2003).冕流是日冕中最为显著的大尺度亮结构,与太阳风起源和加速、CME的起源与演化、日冕激波、粒子加速和射电爆发等过程密切相关. Chen等(2011)发现了迄今为止最大尺度的日冕波动——冕流波,将冕震学研究应用拓展至延伸日冕区域.冕流波由CME冲撞冕流结构所激发,沿等离子体片外传. CME与冕流作用能够引起的“隆起”和“断谱”两类II型射电暴特征分别对应于CME进入和穿出冕流的两种情况.

(3) 日冕物质抛射的传播及相互作用. CME在行星际空间传播过程中受到自身演化、背景磁场和太阳风的影响,同时也受到在传播途中所遭遇的激波和其他CME等行星际瞬变空间结构的影响. CME在日地空间传播时并不一定严格沿着日心径向,可能存在偏转效应.在太阳附近,由于背景磁场较强, CME偏转主要受背景磁场所控制而偏向背景磁能密度低的区域(Shen等, 2011).随着CME向外传播至行星际空间,背景磁场强度逐渐减弱,背景太阳风开始控制CME传播过程.慢速CME将在背景太阳风的大尺度螺旋结构推动作用下发生西向偏转,而受背景太阳风阻碍的快速CME将发生东向偏转(Wang Y等, 2004).快速CME事件在日地空间的整个传播过程可分为脉冲加速相、急剧减速相、近常速传播相(Liu Y D等, 2013). Liu Y D等(2014)揭示了CME在1AU到30AU的传播与演化的特征. CME之间的相互作用过程会使CME动力学特征(包括传播速度和传播方向等)发生显著变化. STEREO卫星成像观测数据分析表明CME之间的相互作用可能对应于系统总动能增加的相互作用过程(Shen C R等, 2012). Liu Y D等(2014)发现超级太阳风暴事件是

太阳活动区连续爆发产生的复合事件,揭示太阳风预调可能是产生卡林顿级事件的必要条件,提出超级事件本质上是“完美风暴”的假说.

4.3.2 磁层的扰动过程

(1) 磁层顶太阳风能量与粒子的进入. 日侧磁场重联是太阳风物质、能量进入磁层的重要机制,其发生的位置、产生的结构及其变化对于认识磁层扰动过程十分重要.观测发现不同IMF条件下向阳面磁层顶磁重联发生位置也会不同.在行星际磁场不北向分量为主时,重联最可能发生在向阳面磁层顶的重联线带中(Pu等, 2007),磁层顶通量传输事件的尺度变化显示出磁层顶磁重联的时变特性(Sun等, 2019).同时粒子观测也证明了KH不稳定性激发重联的可能性(Li W等, 2016).一般认为太阳风的物质主要由向阳面的注入为主, Cluster卫星观测发现磁平静期在背阳面高位地区存在聚集的太阳风离子,表明这个新的“入侵窗口”主导了平静期太阳风的进入过程,为太阳风向磁层的粒子输运提供了新的渠道(Shi等, 2013).

与磁层高纬过程相关的电离层扰动的产生和演变过程,是理解日地能量传输的一个重要窗口.尽管人们一直认为重联推动着磁层大尺度对流循环,但直接的证据还是相对缺乏. Zhang Q H等(2013)利用极区电离层大范围等离子体观测,在不同行星际磁场条件下直接观测到极区电离层等离子体云块的完整演化过程,进而找到了这一对流循环的直接观测证据,确认了日地能量耦合特征时间为约3h,并发现快速运动的极盖区等离子体云块是氧离子上的重要源区(Zhang Q H等, 2016).

(2) 磁尾的亚暴与高速流.太阳风的能量通过磁层顶的重联过程进入地球磁层,以磁场的形式储存在地球磁尾.在适当的条件下,这些能量会释放进入电离层和内磁层,引起地球空间环境剧烈扰动.其中一种重要的能量释放和输运过程是磁层亚暴.高速粒子流是磁尾等离子体片中连接磁尾重联和亚暴的关键媒介.一般认为高速流的形成与近磁尾中心片中的重联过程有关. Cao等(2006)根据Cluster卫星观测确认了磁层亚暴与高速粒子流之间存在一一对应关系,高速粒子流的持续时间比单点卫星估计的要长将近一倍.此外由于理想流体假设在磁层中并不完全成立,高速流的能量输运率被严重低估,依据全新的高速流能量输

运动力学方法计算出的高速流能量输运率要明显大于以往磁流体力学估算结果(Cao等, 2013), 这充分证明高速流在能量输运过程中的重要作用. 高速流常常还在行进的前端形成一个偶极化锋面, 其特征为磁场南北分量的增强. 高速流在近地减速/偏转的晨侧(昏侧)边缘区域, 对应着I区性质的下(上)行场向电流, 可以构成一个亚暴电流楔模型(Yao等, 2012). 针对偶极化锋面的形成, 结构以及电流特性等取得了很多研究成果. 锋面附近存在大量的波动(Deng等, 2010). 锋面对粒子的准捕获与非绝热加速效应, 使得高速流中热离子在锋面传输过程中出现各向异性(Zhou等, 2010). 观测证据表明重联产生的偶极化锋面可以加速电子(Fu等, 2013).

(3) 内磁层中的波与粒子相互作用. 地球内磁层中不同能量的粒子共存, 使得这一区域波动现象十分丰富. 同时多种类型的波动, 可以通过波-粒相互作用实现对环电流、辐射带和等离子体层粒子的调制与加速. 在众多等离子体波动中, 电磁场振幅最大的波动通常是频率在mHz量级的ULF波. 传统的观点认为, 磁层超低频波能量来源于自发的等离子体不稳定性, 最近宗秋刚等研究表明超低频波主要是由外部太阳风变化驱动, 并可以通过两种不同的共振过程将能量分别转移给离子和电子(Zhang等, 2010; Zhao等, 2017). 由于内磁层中的能量粒子存在漂移运动, 粒子的能量可以显著地被极向模超低频波——电场振荡在方位角方向上的分量加速, 即通过漂移共振导致粒子能量增加. 研究表明地球磁层超低频波-粒子相互作用中起关键作用的波模是超低频波的极向模, 而不是学界先前普遍认为的环向模, 这是因为超低频波极向模的波长较短, 信号在穿过电离层时衰减, 难以被地面的地磁台站记录(Zong等, 2012). Dai等(2013)通过分析电场和粒子通量相位差, 给出磁层波粒漂移共振机制的直接观测证据. Zhou等(2016)拓展了原有的线性共振理论, 发展了非线性波粒共振理论, 得到的结果被用来作为相应探测仪器的标定指标. 哨声波回旋共振是控制辐射带电子演化的核心机制之一, 以往研究通常集中于分析磁层内部亚暴活动对于哨声波的影响, 而Su等(2015)发现太阳风动压脉冲能够即时改变磁层磁场位型和热粒子分布, 抑制哨声波的非线性激发和空间传播, 可以使哨声波在广阔空间范围内消失数个小时. 合声波和嘶声是两种重要的磁层空

间等离子体波动, 影响着外辐射带和槽区电子的时空变化. Xiao等(2015)等认为合声波和快磁声波的联合散射能够很好地解释辐射带相对论电子蝴蝶状投掷角分布的形成过程. Zhao等(2019)深入研究蝴蝶状分布特征, 发现辐射带电子存在不遵循“电子通量随能量上升单调递减”的反常能谱, 提出等离子体层嘶声是产生该反常能谱的主因. EMIC波对辐射带相对论电子和环电流质子都有显著的回旋共振散射效应, 热等离子体背景会对这一过程发生影响, Ni等(2018)在此基础上建立了热等离子体条件下EMIC波的电子散射系数量化模型. 在内磁层的研究中, 等离子体层顶位置在地磁活动期间有着复杂的变化, 被认为是内磁层动力学研究中的一个重要的参数. Liu等(2015)利用最新的THEMIS卫星的电位观测数据反演电子密度, 并用来确定等离子层顶的位置, 该模型被证明明显优于以往的等离子体层顶模型, 得到了广泛的应用.

4.3.3 电离层的研究

(1) 电离层的时空扰动. 近期研究表明电离层的峰值密度受太阳活动影响非常复杂. Liu和Chen(2009)提出了电离层随太阳活动性变化呈现多种类型, 包括线性增长型、非线性饱和型和非线性放大型. 历史数据还表明电离层对太阳辐射强度变化的响应具有变缓的特征(Liu等, 2011). 地球磁层的扰动一般都会造成电离层的扰动, 出现电离层正暴或者负相暴. Xu等(2000)发现在磁暴急始之后赤道异常峰区出现电子密度的从底到顶的整个F区耗空; 在磁暴主相期间, 白天顶部电子密度长时间持续的增强, 赤道异常纬度近30的区域出现清晰的F2~F3层结构和柱状电子密度增强, 高度延伸至约2000km. 特大磁暴期间低纬电离层的“超级喷泉”效应及电离层再分层结构则可能与磁暴恢复相阶段电离层赤道异常双峰的非对称半球抑制与南北极上层大气注入能量的不对称有关(Zhao B等, 2005). 基于反演大量低轨卫星导航信标观测, 近期顶部电离层的研究发现磁暴恢复相期间顶部电离层总电子含量出现持续多天的负相响应, 等离子体沿磁力线的扩散作用与中高纬度长时间低氧/氮气浓度比可能是其主要原因(Zhong等, 2016). 在电离层结构变化研究方面, Zhao等(2011)通过掩星资料给出了电离层F3层的全球精细分布, 统计确定F3层最大发生率位于夏季半球磁纬 $7^{\circ}\sim 8^{\circ}$, 具有受DE3调制的经度变化特征. Liu L等

(2013)得到了夜间电离层增强的全球分布图像, 发现子夜后低纬电离层存在一类新的增强现象, 表现为伴随峰值电子密度增强, 峰高下降, 剖面变薄, 观测和模式确定西向电场是这一现象的主因, 此外夜间增强期间等离子体层与电离层存在南北半球磁共轭耦合效应, 提供了冷等离子体跨越半球运输的关键证据(Chen等, 2015). COSMIC卫星资料观测表明偶发E层可以在一个很大区域长时间存在, 表现为2层或者多层结构的Es(Yue等, 2015). 电子浓度峰高也存在赤道异常现象, 且在春分点时最显著(Luan等, 2016). 电离层中的各种等离子体不稳定性及非线性过程, 在赤道和极区电离层中产生不同尺度的等离子体不均匀体, 导致通过电离层传播的电磁波的幅度和相位出现随机起伏, 即电离层闪烁现象. 电离层闪烁引起卫星通信质量下降, 卫星导航信号失锁等. 分布式电离层探测雷达组网观测到2009年7月22日日食期间, 重力波穿越Es层, 引发中纬白天E区场向不均匀体, 观测表明重力波和K-H不稳定性结合可以用来解释不均匀体的产生(Chen等, 2014).

(2) 电离层模式化研究. Ren等(2009)开发了模拟真实地磁场的电离层发电机理论模式TIDM-IGGCAS-II和三维电离层理论模式TIME3D-IGGCAS, 在APEX磁坐标系求解时变的电离层参数. Ren等(2008b)发展了三维时变的全球电离层-热层理论模式GCITEM-IGGCAS, 自洽求解主要的热层电离层参数(密度、温度、速度和电场等), 能够很好再现电离层/热层的形态和主要变化特征. 利用COSMIC星座的掩星观测及全球测高仪观测资料, 采用双层经验正交函数 EOF 分解、谐波函数展开及回归分析等技术, 建立的F2层峰高 $h_m F_2$ 全球经验模型(Zhang等, 2014), 描述实际观测的能力优于国际参考电离层(IRI)模型. Yue等(2018)发展了迭代掩星电子密度反演新方法; 引入稀疏矩阵的方法, 克服了Kalman滤波与集合Kalman滤波电离层数据同化面临的大规模运算和存储问题, 摆脱了对超级计算的依赖, 发展出一套基于不同手段全球观测的电离层同化新技术, 并用数据同化的思想首次进行了“古”电离层(12000年以来)重构. 利用中国大陆构造环境监测网络(CMONOC)的GPS观测数据, 开发了中国地区TEC和电子密度同化模型, 其中TEC模型已实现实时运行和在线发布(Aa等, 2015).

4.3.4 中高层大气扰动及与电离层的耦合

(1) 大气重力波研究. 大气重力波是在层结稳定大气中由于空气微团受到扰动而在其平衡位置发生震荡, 这种震荡在合适条件下能够在大气中传播. 在重力波传播过程中, 非线性相互作用十分重要. Zhang和Yi(2004)通过建立非线性数值模式研究, 提出共振和非共振作用均能引起初级波与次级波之间的能量交换, 使得重力波波谱更加广泛. 此外重力波的传播还与背景流密切相关, 在具有水平剪切的经向风场中传播时, 能够发生反射和透射, 这一现象依赖于波动的参数和风场结构. Liu X等(2014)利用非线性模式模拟了大气重力波在热层大气背景中传播的完整过程, 提出低热层具有很强的静力稳定性以及重力波与潮汐之间的非线性相互作用是引起该高度上经常出现的强风场和风场剪切的原因. Zhang Y等(2012)利用SABER探测器测量的温度数据, 研究了平流层重力波有效位能的全球分布特征及其年变化和半年变化特性, 分析了低纬地区重力波活动的准两年震荡与纬向风场之间的关系. 地基台站的联网观测在研究较大区域的重力波活动方面具有独特的优势, Zhang S D等(2013)对美国地区72个台站在1998~2008年期间测量数据的分析结果表明, 对流层中的重力波位能的峰值出现在中纬地区, 而低平流层中的重力波位能的峰值出现在低纬地区. 针对中高频重力波, 其能量密度和水平动量通量峰值出现在中高纬度地区的对流层中部. Li等(2016)利用安装在云南曲靖台站(25.6°N, 103.7°E) 3年(2012~2014年)的OH全天空气辉成像仪数据给出了地形强迫影响中高层大气重力波的定量观测证据, 证明了青藏高原对中高层大气重力波的产生和传播特性具有重要影响.

(2) 行星尺度的大气波动. 大气波动是中高层大气的主要扰动形式, 其中行星尺度的大气波动(潮汐波和行星波)在传播过程中, 影响各层区的动力学过程、能量交换及成分的输运, 在各层区间的耦合中发挥重要作用. Wan等(2008)利用全球电离层电子浓度总含量(TEC)观测资料, 采用经度波数谱分析方法提取了电离层经度“四波”结构, 系统刻画了“四波”结构的典型变化特征; Ren等(2008a)利用卫星数据发现, 顶部电离层电子密度和电子温度也存在类似的经度“四波”结构, 两种“四波”结构的强度表现出明显的负相关性, 且都与低层大气潮汐DE3有关; 他们基于自主开发的电

离层/热层理论模式模拟论证了低层大气潮汐如DE3驱动电离层和热层“四波”结构的机理。Xiong等(2013)通过观测证实对流层行星波的作用促使形成冬季平流层的爆发性增温, 这一增温过程可以形成各层区耦合的特殊通道, 低层大气潮汐波和行星波可将能量、动量传输到中间层、低热层乃至热层/电离层, 在各层区产生强烈的响应。为了对大气潮汐和行星波的变化性进行定量描述, Yu等(2015)基于对中层高层大气的长期连续观测, 系统研究了大气潮汐和行星波不同尺度的时间变化特征, 揭示了它们的气候学特征(包含季节变化、年际变化)及其对厄尔尼诺-南方涛动、准两年振荡等低层大气现象的响应, 同时打破了目前探测手段无法同时提供高时、空分辨率的波动信息的局限, 在经典潮汐理论的框架下提供了大气波动高时间分辨率的区域性空间分布。

(3) 大气层-电离层耦合。由于台风、海啸/地震等事件引起的近地表波动, 通过动力学和电动力学等形式向上传输, 可以通过大气圈-电离圈的耦合造成电离层扰动。肖佐等发现震后与电离层扰动同步的地磁场扰动, 表明声重力波与电离层扰动的关联及在激发电离层不规则结构的种子作用(Xiao等, 2007; Hao等, 2012)。日食过境、浅表大地震、火箭发射等局域源都有可能激发中尺度电离层扰动(Ding等, 2011)。观测到这些扰动的精细结构, 特别是火箭发射后出现波动的大范围传播过程以及火箭过境后尾气导致的电离层空洞, 有可能获得火箭的位置、速度等信息, 对火箭/导弹监测具有重要价值。日食也能对电离层系统造成显著影响。近期进一步研究表明, 电离层和热层对日食的响应不是瞬时效应, 而是全球性的且伴随有大尺度行进式扰动产生和传播, 日食结束后伴随多天的恢复过程(Lei等, 2018)。

(4) 中层大气-太阳/地磁活动耦合。中间层顶区域大气分子间的运动以碰撞为主, 一般认为不受地球磁场以及地磁活动的直接影响。利用注入中间层顶区域(85~95km)流星尾迹等离子体双极扩散系数, 易稳等人发展了中间层顶大气密度和温度反演算法, 并基于此开展了中间层顶中性大气密度对地磁活动响应的研究。他们发现南极中间层顶中性大气密度存在对太阳风共转作用区导致的重现地磁活动的响应(Yi等, 2017), 且与地磁活动 Kp 指数负相关, 这与此前研究报道的热层高度中性大气密度与地磁活动 Kp 指数正相

关不同。进一步, 通过研究中间层中性大气密度对强地磁暴的响应, 表明在强磁暴期间南北极中间层顶大气密度存在明显的下降(可超过10%), 且密度对磁暴负响应可以延伸至中纬度(40°)地区(Yi等, 2018)。这些观测事实将地磁活动对中性大气的影响延伸到中间层顶区域, 有助于进一步理解空间天气的日地能量耦合过程。

4.4 多卫星分析方法成果

进入21世纪后, 包括中国在内的各个国家相继实施了Cluster、双星、THEMIS、SWARM和MMS等“多卫星计划”。然而早期的多点探测数据分析手段有限, 限制了对观测数据的分析及对物理过程的认识。针对这个问题, 中国学者相继发展了电流最小方差分析、磁场几何分析、磁结构维度和方向速度分析、磁场零点判定、磁结构重构等方法, 大大促进了学界对多尺度三维磁结构特性的研究, 丰富了国际上对磁结构空间等离子体动力学过程的时空变化等关键问题的理解。

磁场的几何特性常常影响磁层的动力学过程。Shen等(2003)提出了磁场曲率分析方法, 用来确定磁力线的三维几何结构, 其中包括曲率方向、曲率半径参量等。此类方法可广泛应用于磁通绳、磁尾电流片、尾瓣、磁层顶、内磁层等磁场结构的几何特性分析之中; 最近还被用来判断磁场重联中的电子耗散区, 具有良好的判定效果。为了克服卫星数目不够或者多卫星的位形不规则等问题, Shen C等(2012)提出了基于任意卫星星簇形态的多点探测分析方法, 成功应用于THEMIS观测分析, 发现磁层顶侧翼电流密度和流场涡度的周期性结构, 以及磁暴期间内磁层环电流的全球分布规律。

磁结构的维度对于建立合适的坐标系和参照系至关重要, 但由于以往的分析方法不能给出磁结构维度, 往往不能得到准确的结构特征方向信息, 也不能给出结构整体的瞬时速度。Shi等(2019)构建并发展了结构维度和速度特征分析方法(MDD和STD方法), 即从维数的定义出发, 利用多颗卫星测量的磁场的时间和空间变化, 反演出磁结构运动速度, 从而最终导出可直接与理论和模拟计算结果进行对比的磁结构坐标系和参照系。为了使传统的时间分析方法(Timing方法)能够扩展到二维和三维的情况下, Zhou等(2006)提出了

一种多三角分析方法(简称MTA方法), 能够给出磁结构的特征方向和速度, 经分析此方法也有判断维数的能力。

磁零点是磁场重联过程中一个至关重要的磁结构, 而由于观测误差的存在, 使用单点观测数据无法确定是否存在磁零点。Zhao H等(2005)首先提出基于拓扑度计算庞加莱指数的方法, 从太阳磁场的观测来寻找日冕磁场重联过程中的磁零点, Xiao等(2006)将此方法应用到四颗卫星的局地观测系统, 在地球磁层重联区中发现了磁零点和零点对, 并通过磁场梯度张量的特征来判定磁零点类型, 成为Cluster卫星计划的代表性发现之一。空间等离子体中磁重联区域是一个复杂的三维结构, 而不是一个几何零点。He等(2008)将局地磁场分为势场和Harris电流片磁场两部分, 通过多卫星数据确定相应特征参数, 解析反演出卫星簇附近空间的磁场分布, 提供了一种磁场三维可视化的有利工具。近年来, Fu等(2015)采用一阶泰勒展开(FOTE)的方法来判断磁零点类型、位置, 并对磁零点等磁结构进行了重构。该方法也被广泛应用于磁重联扩散区的能量耗散过程、磁重联电子扩散区的识别、次级重联等研究中(Fu等, 2017)。

4.5 预报技术的进步

空间环境是航天活动的场所、电波信号传播的媒介, 空间环境的扰动变化(即空间天气)威胁空间技术系统的安全、影响导航和通讯的质量。20世纪90年代随着中国航天事业的发展, 空间环境研究与预报日益受到重视, 进入快速发展和运行阶段。经过几十年的发展, 目前中国已具备空间环境核心要素的预报能力, 空间环境事件和空间环境指数的预报达到国际先进水平, 成为国际上少数几个具备为航天工程提供空间环境预报保障服务的国家之一。

4.5.1 预报模式

进入21世纪, 为了提高预报水平, 在国家高技术计划、载人航天工程、科学院知识创新工程等的支持下, 在空间物理研究的基础上, 大力开展了空间环境预报技术和预报模式研究, 建立了数十种空间环境预报模式。这些模式中有针对太阳耀斑、质子事件、地磁暴、高能电子等的空间环境事件预报模式, 有针对太阳F10.7指数、地磁指数等的空间环境指数预报模式,

也有针对太阳风、电离层、辐射带等环境区域的参数预报模式, 覆盖了太阳活动、行星际扰动、近地空间扰动等方面的关键预报要素。这些预报模式的建立, 显著提高了中国空间环境关键要素的预报精度和准确性, 拓展了空间环境预报的内容, 促进了中国空间环境预报由人工经验向模式预报的转变。其中, 2010年建立了动态非对称全球磁层顶模式(Lin等, 2010), 模式对地球同步轨道磁层顶穿越事件的报准率提升了16%。Zhang J J等(2012)建立了全球地磁感应电流(GIC)预报模式, 为大规模电网GIC预报及风险评估提供了新手段。

4.5.2 预报业务

为了提高空间环境预报效率, 辅助预报员开展预报工作, 预报机构在建设和发展中都十分重视预报业务技术系统的研发。从20世纪90年代起步, 经过多年发展, 2012年形成了具有国际水平的空间环境预警系统。该系统实现了6类150余种空间环境监测数据自动收集和处理; 集成了包括地磁指数预报模式、太阳质子事件预报模式、电离层同化模式、磁层顶模式等在内的十多种预报模式; 转化了日面活动区演化分析方法、日冕物质抛射的运动参数自相似提取法等多种空间环境预报先兆因素的分析方法; 具备了无人值守下太阳耀斑、质子事件、地磁暴等灾害性空间环境事件的自动报警。该系统的建立, 实现了数据收集、数据处理、模式运算、预报分析、产品制备、信息发布等空间环境预报业务过程的一体化, 显著提升了中国空间环境预警的保障服务能力。

4.6 研究领域的延伸——行星空间物理

进入21世纪之后, 中国行星空间物理研究才逐渐从零星的跟踪研究过渡到规模化的团队研究, 呈现出“起步晚、起点高、发展快、国际化”等特点。在深空探测国家战略的牵引下, 随着青年人才不断引进, 国际交流逐渐增多, 十几年来取得了长足进步。

4.6.1 行星高层大气和电离层

行星高层大气和电离层是行星空间物理学的重要研究内容。2003年王劲松提出了一个描述火星日侧电离层电子密度分布随沙尘暴的响应模型, 该模型成功描绘了沙尘活动诱发的大气加热以及电子产生率上漂

现象, 结果表明沙尘暴的发生可以导致火星电离层抬升约30km(Wang和Nielsen, 2003). 此外, Zou等(2005)基于“火星全球勘探者”数据获得了火星低层大气季节性变化规律对火星日下点电离层顶位置的调制作用, 如在太阳经度134~146所代表的季节, 北半球与南半球的电离层顶高度相差约8km. Cui等(2012)在国内率先开展了类木行星系统的相关方向研究, 基于“卡西尼号”卫星数据系统性分析了土星最大的卫星——土卫六高层大气中的甲烷分布, 研究表明甲烷具有强逃逸现象, 且逃逸率具有较大的时空变化性. 在行星中低层大气方面, 采用火星勘查卫星数据提取了火星大气波动特性, 研究了火星中层大气迁移潮汐波和非迁移潮汐波的纬向变化和季节性规律, 并且在火星大气中发现了三种新的非迁移潮汐(Wu等, 2015). 针对系外行星大气, Tian等(2014)利用数值模拟的手段研究了在恒星演化早期阶段的强紫外辐射对宜居带内行星大气氧含量的影响, 研究表明这一情况下的大气氧分子和臭氧分子含量比太阳系宜居带内行星高2~3个数量级, 因而大气中的氧含量不能够作为系外行星生命的示踪物.

4.6.2 行星磁层

中国行星磁层研究主要围绕水星、金星、火星和土星展开, 主要关注磁重联过程和磁层形态两个方面. Zhang T L等(2012)分析了欧洲“金星快车”探测器的观测数据, 发现了金星磁尾中存在磁重联过程的证据. Zhong等(2018)利用美国“信使”号卫星数据, 发现了水星磁尾的重联区及其快速演化过程. 至此可以认为, 太阳系八大行星的磁尾均存在磁重联过程. Guo等(2018)分析美国“卡西尼”的观测数据, 发现了土星快速旋转触发的日侧磁层磁重联. 行星物理团队对金星和火星的感应磁层形态进行了系统化的研究. Rong等(2014)利用“金星快车”的磁场数据首次重构了金星磁尾下游3个金星半径以内磁场的三维结构分布, 证实感应磁尾是行星际磁场垂挂形成的, 发现磁场在南北半球侧翼处向磁赤道面呈“沉降”结构, 且磁场结构出现明显的半球不对称. Chai等(2019)发现金星磁尾边界层处的磁场是呈螺旋状分布的, 并且进一步证实该螺旋结构也存在于火星磁尾, 这一发现深化了对行星感应磁层形成机制的理解. Zhang H等(2016)通过观测和数值模拟研究了月球附近的磁场结构, 确认了月球尾迹中的

“阿尔芬翅”结构, 并进一步揭示这些结构伴随着场向电流等精细特征.

4.6.3 比较行星研究

中国行星空间物理研究的发展受到国际和国内行星探测与研究发展趋势的双重影响. 当前, 国际行星科学的研究重点是行星宜居性演化, 行星探测也多以宜居环境要素或生命信号为主要目标. 在此背景下, Wei等(2014)发现金星弓激波外的氧离子逃逸通道, 其逃逸通量可达到弓激波内逃逸通量的同一数量级, 并对地磁场倒转与生物大灭绝的因果关系进行理论研究, 提出了行星大气逃逸导致宜居性破坏的猜想(Wei等, 2017). Cui等(2018)研究发现火星大气的多个属性, 如温度、电离率、等离子体输运特性等明显受火星局域磁场构型的调制, 这意味着行星内部的磁演化历史可以在很大程度上影响火星环境的宜居性.

5 展望与结语

中国的空间物理领域的研究在20世纪30年代萌芽和起步, 经历了改革开放40年的发展, 特别是近20年的发展后, 研究团队得到了壮大, 研究水平逐步提升, 已经成为国际空间物理学领域一支重要的研究力量. 未来空间物理研究将与探测工程深度融合, 国际影响力可望日益增强.

在地基观测能力建设方面, 目前已经开展了子午工程二期, 即在子午工程为骨干的地基监测链基础上, 沿经向和纬向延拓, 通过多种观测手段对中国重点区域进行加密观测, 充实并完善沿100°E和40°N的两条观测链, 与子午工程的120°E和30°N观测链共同构成覆盖中国上空的空间环境地基综合监测. 子午工程二期预期2019年开始建设, 建设期4年. 在子午工程的基础上, 中国科学家倡议和发起“国际子午圈大科学计划”, 利用地球上唯一陆地可闭合的120°E+60°W子午圈的属于近十个不同国家的1000多台不同种类的空间环境监测设备, 深入研究和了解地球空间系统传统和非传统自然灾害形成和演化的物理规律, 为人类提供可靠及高效的预报与防范策略.

随着经济实力的飞跃, 中国也迎来了空间探测与研究的发展机遇. “张衡一号(ZH-1)”探测卫星(李文静等, 2018)于2018年2月发射入轨, 该卫星搭载了高精度

磁强计等八个科学载荷, 在空间物理学、地球物理学等领域具有重要价值. 中国与欧洲、加拿大等国科学家联合推进的“太阳风-磁层相互作用全景成像”(微笑卫星, SMILE)卫星任务预计于2023/24年发射, 届时将实现对地球空间大尺度结构的整体成像(Wang和Graziella, 2018), 揭示太阳风与磁层相互作用规律. 此外即将发射的中国第一颗太阳观测卫星, 结合“太阳探针(PSP)”和“太阳环绕器(SoIo)”这两个国际卫星计划, 将在有关太阳大气动力学、太阳风加热加速、太阳风暴的触发及传播演化等研究领域迎来新的研究热潮. 计划于2020年发射的中国自主火星探测卫星也为行星空间物理学的发展提供了绝佳的机会, 中国探月后续任务和深空探测计划也包含了许多重要的空间物理相关的探测和研究(Wei等, 2018), 相信会为空间物理学的研究开拓出新的疆域.

致谢 本文从策划到成文过程中, 得到空间物理学界许多同行的支持和建议, 特别向以下各位致以衷心感谢! 万卫星、雷久侯、宁百齐、刘四清、陈耀、倪彬彬、张清和、申成龙、崔峻、沈超、符慧山、熊鹰、刘颖、程鑫、何建森、胡泽骏、薛向辉、李钦增、刘晓和余优等.

参考文献

- 黄信榆, 谭子勋. 1984. 含谷电离层频高图剖面分析. *地球物理学报*, 27: 503–510
- 刘振兴. 2001. 地球空间双星探测计划. *地球物理学报*, 44: 573–580
- 刘振兴, 濮祖蔭. 1964. 磁暴期间外辐射带结构的变化. *地球物理学报*, 13: 189–200
- 万卫星, 李钧. 1987. 由高频无线电波反射回波参数反演电离层运动和结构的高度剖面. *空间科学学报*, 7: 85–94
- 汪景琇, 季海生. 2013. 空间天气驱动源——太阳风暴研究. *中国科学: 地球科学*, 43: 883–911
- 王水, 方励之. 1979. 太阳风中的大尺度涡旋波. *中国科学*, 9: 373–383
- 王水, 李波, 赵寄昆. 2000. 日冕物质抛射. *天文学进展*, 18: 192–208
- 章公亮. 1984. 太阳耀斑引起的日球和地磁扰动. *中国科学: 数学 物理学 天文学 技术科学*, 14: 254–262
- 中国空间物理学学科发展战略研究组. 1996. 中国空间物理学学科发展战略研究报告. *地球科学进展*, 11: 140–150
- 李钧. 1983. 电离层声重波引起的高频多普勒频移. *地球物理学报*, 26: 1–8
- 李文静, 申旭辉, 谭巧, 鲁恒新. 2018. 张衡一号: 中国地震立体观测体系第一个天基平台. *科技纵横*, 9: 56–59
- 赵九章, 徐荣栏, 周国成. 1963. 带电粒子在偶极磁场中的运动区域及其模型实验. *科学通报*, 14: 56–57
- 张永维, 袁仕耿. 2008. 中国的地球空间双星探测计划. *中国航天*, 5: 12–17
- Aa E, Huang W, Yu S, Liu S, Shi L, Gong J, Chen Y, Shen H. 2015. A regional ionospheric TEC mapping technique over China and adjacent areas on the basis of data assimilation. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 5049–5061
- Cao J B, Liu Z X, Yang J Y, Yian C X, Wang Z G, Zhang X H, Wang S R, Chen S W, Bian W, Dong W, Zhang Z G, Hua F L, Zhou L, Cornilleau-Wehrin N, de Laporte B, Parrot M, Alleyne H, Yearby K, Santolik O, Mazelle C. 2005. First results of low frequency electromagnetic wave detector of TC-2/Double Star program. *Ann Geophys*, 23: 2803–2811
- Cao J B, Ma Y D, Parks G, Reme H, Dandouras I, Nakamura R, Zhang T L, Zong Q, Lucek E, Carr C M, Liu Z X, Zhou G C. 2006. Joint observations by Cluster satellites of bursty bulk flows in the magnetotail. *J Geophys Res*, 111: A04206
- Cao J, Ma Y, Parks G, Reme H, Dandouras I, Zhang T. 2013. Kinetic analysis of the energy transport of bursty bulk flows in the plasma sheet. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 313–320
- Chai L, Wan W, Wei Y, Zhang T, Exner W, Fraenz M, Dubinin E, Feyerabend M, Motschmann U, Ma Y, Halekas J S, Li Y, Rong Z, Zhong J. 2019. The induced global looping magnetic field on Mars. *Astrophys J*, 871: L27
- Chen G, Jin H, Yan J Y, Cui X, Zhang S D, Yan C X, Yang G T, Lan A L, Gong W L, Qiao L, Wu C, Wang J. 2017. Hainan coherent scatter phased array radar (HCOPAR): System design and ionospheric irregularity observations. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 55: 4757–4765
- Chen G, Wu C, Zhao Z, Zhong D, Qi H, Jin H. 2014. Daytime E region field-aligned irregularities observed during a solar eclipse. *J Geophys Res-Space Phys*, 119: 10633–10640
- Chen Y, Feng S W, Li B, Song H Q, Xia L D, Kong X L, Li X. 2011. A coronal seismological study with streamer waves. *Astrophys J*, 728: 147
- Chen Y, Liu L, Le H, Wan W, Zhang H. 2015. $N_m F_2$ enhancement during ionospheric F_2 region nighttime: A statistical analysis based on COSMIC observations during the 2007–2009 solar minimum. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 10083–10095
- Chen Y, Hu Y Q. 2001. A two-dimensional Alfvén wave-driven solar wind model. *Sol Phys*, 199: 371–384
- Cheng X, Zhang J, Liu Y, Ding M D. 2011. Observing flux rope formation during the impulsive phase of a solar eruption. *Astrophys J*, 732: L25
- Cui J, Yelle R V, Strobel D F, Müller-Wodarg I C F, Snowden D S,

- Koskinen T T, Galand M. 2012. The CH₄ structure in Titan's upper atmosphere revisited. *J Geophys Res*, 117: E11006
- Cui J, Yelle R V, Zhao L L, Stone S, Jiang F Y, Cao Y T, Yao M J, Koskinen T T, Wei Y. 2018. The Impact of crustal magnetic fields on the thermal structure of the Martian upper atmosphere. *Astrophys J*, 853: L33
- Dai L, Takahashi K, Wygant J R, Chen L, Bonnell J, Cattell C A, Thaller S, Kletzing C, Smith C W, MacDowall R J, Baker D N, Blake J B, Fennell J, Claudepierre S, Funsten H O, Reeves G D, Spence H E. 2013. Excitation of poloidal standing Alfvén waves through drift resonance wave-particle interaction. *Geophys Res Lett*, 40: 4127–4132
- Deng X, Ashour-Abdalla M, Zhou M, Walker R, El-Alaoui M, Angelopoulos V, Ergen R E, Schriver D. 2010. Wave and particle characteristics of earthward electron injections associated with dipolarization fronts. *J Geophys Res-Space Phys*, 115: A09225
- Ding F, Wan W, Xu G, Yu T, Yang G, Wang J. 2011. Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by a GPS network in central China. *J Geophys Res*, 116: A09327
- Ding Z H, Wu J, Xu Z W, Xu B, Dai L D. 2018. The Qujing incoherent scatter radar: System description and preliminary measurements. *Earth Planets Space*, 70: 87
- Dou X K, Qiu S C, Xue X H, Chen T D, Ning B Q. 2013. Sporadic and thermospheric enhanced sodium layers observed by a lidar chain over China. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 6627–6643
- Feng X S, Jiang C W, Xiang C Q, Zhao X P, Wu S T. 2012. A data-driven model for the global coronal evolution. *Astrophys J*, 758: 62
- Feng X, Zhou Y, Wu S T. 2007. A novel numerical implementation for solar wind modeling by the modified conservation element/solution element method. *Astrophys J*, 655: 1110–1126
- Fu H S, Khotyaintsev Y V, Vaivads A, Retinò A, André M. 2013. Energetic electron acceleration by unsteady magnetic reconnection. *Nat Phys*, 9: 426–430
- Fu H S, Vaivads A, Khotyaintsev Y V, André M, Cao J B, Olshevsky V, Eastwood J P, Retinò A. 2017. Intermittent energy dissipation by turbulent reconnection. *Geophys Res Lett*, 44: 37–43
- Fu H S, Vaivads A, Khotyaintsev Y V, Olshevsky V, André M, Cao J B, Huang S Y, Retinò A, Lapenta G. 2015. How to find magnetic nulls and reconstruct field topology with MMS data? *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 3758–3782
- Gong J C, Cai Y X, Liu S Q, Shi L Q, Lu G R, Chen Z F, Bao L L. 2016. Development of operational space environment technology system. *Chin J Space Sci*, 36: 753–761
- Gong J C, Liu S Q, Shi L Q, Luo B X, Chen Y H, Huang W G, Cao J B, Xie L, Lei J H, Tang W W. 2014. Development of operational space weather prediction models. *Chin J Space Sci*, 34: 688–702
- Guo R L, Yao Z H, Wei Y, Ray L C, Rae I J, Arridge C S, Coates A J, Delamere P A, Sergis N, Kollmann P, Grodent D, Dunn W R, Waite J H, Burch J L, Pu Z Y, Palmaerts B, Dougherty M K. 2018. Rotationally driven magnetic reconnection in Saturn's dayside. *Nat Astron*, 2: 640–645
- Guo X C, Wang C, Hu Y Q, Kan J R. 2008. Bow shock contributions to region 1 field-aligned current: A new result from global MHD simulations. *Geophys Res Lett*, 35: L03108
- Han D S, Chen X C, Liu J J, Qiu Q, Keika K, Hu Z J, Liu J M, Hu H Q, Yang H G. 2015. An extensive survey of dayside diffuse aurora based on optical observations at Yellow River Station. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 7447–7465
- Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. 2012. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake. *J Geophys Res*, 117: A02305
- He F, Zhang X X, Chen B, Fok M Q. 2011. Reconstruction of the plasmasphere from Moon-based EUV images. *J Geophys Res-Space Phys*, 116: A11203
- He H, Shen C, Wang H, Zhang X, Chen B, Yan J, Zou Y, Jorgensen A M, He F, Yan Y, Zhu X, Huang Y, Xu R. 2016. Response of plasmaspheric configuration to substorms revealed by Chang'e 3. *Sci Rep*, 6: 32362
- He J S, Tu C Y, Tian H, Xiao C J, Wang X G, Pu Z Y, Ma Z W, Dunlop M W, Zhao H, Zhou G P, Wang J X, Fu S Y, Liu Z X, Zong Q G, Glassmeier K H, Reme H, Dandouras I, Escoubert C P. 2008. A magnetic null geometry reconstructed from cluster spacecraft observations. *J Geophys Res*, 113: A05205
- He J, Tu C, Marsch E, Yao S. 2012. Reproduction of the observed two-component magnetic helicity in solar wind turbulence by a superposition of parallel and oblique Alfvén waves. *Astrophys J*, 749: 86
- He J S, Zhu X Y, Chen Y J, Salem C, Stevens M, Li H, Ruan W Z, Zhang L, Tu C Y. 2018. Plasma heating and Alfvénic turbulence enhancement during two steps of energy conversion in magnetic reconnection exhaust region of solar wind. *Astrophys J*, 856: 148
- Hu Y Q. 1989. A multistep implicit scheme for time-dependent 2-dimensional magnetohydrodynamic flows. *J Comput Phys*, 84: 441–460
- Hu L, Yue X, Ning B. 2017. Development of the Beidou ionospheric observation network in China for space weather monitoring. *Space Weather*, 15: 974–984
- Hu Y Q, Guo X C, Wang C. 2007. On the ionospheric and reconnection potentials of the Earth: Results from global MHD simulations. *J Geophys Res*, 112: A07215
- Hu Y Q, Li G Q, Xing X Y. 2003. Equilibrium and catastrophe of

- coronal flux ropes in axisymmetrical magnetic field. *J Geophys Res*, 108: 1072
- Jiang C W, Feng X S, Wu S T, Hu Q. 2013. Magnetohydrodynamic simulation of a sigmoid eruption of active region 11283. *Astrophys J*, 771: L30
- Jiao J, Yang G, Wang J, Cheng X, Li F, Yang Y, Gong W, Wang Z, Du L, Yan C, Gong S. 2015. First report of sporadic *K* layers and comparison with sporadic Na layers at Beijing, China (40.6°N, 116.2°E). *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 5214–5225
- Lan J, Ning B, Li G, Zhu Z, Hu L, Sun W. 2018. Observation of short-period ionospheric disturbances using a portable digital ionosonde at Sanya. *Radio Sci*, 53: 1521–1532
- Lee L C, Fu Z F. 1985. A theory of magnetic flux transfer at the Earth's magnetopause. *Geophys Res Lett*, 12: 105–108
- Lei J, Dang T, Wang W, Burns A, Zhang B, Le H. 2018. Long-lasting response of the global thermosphere and ionosphere to the 21 August 2017 solar eclipse. *J Geophys Res-Space Phys*, 123: 4309–4316
- Li G, Ning B, Abdu M A, Otsuka Y, Yokoyama T, Yamamoto M, Liu L. 2013. Longitudinal characteristics of spread *F* backscatter plumes observed with the EAR and Sanya VHF radar in Southeast Asia. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 6544–6557
- Li Q, Xu J, Liu X, Yuan W, Chen J. 2016. Characteristics of mesospheric gravity waves over the southeastern Tibetan Plateau region. *J Geophys Res-Space Phys*, 121: 9204–9221
- Li W, André M, Khotyaintsev Y V, Vaivads A, Graham D B, Toledo-Redondo S, Norgren C, Henri P, Wang C, Tang B B, Lavraud B, Vernisse Y, Turner D L, Burch J, Torbert R, Magnes W, Russell C T, Blake J B, Mauk B, Giles B, Pollock C, Fennell J, Jaynes A, Avanov L A, Dorelli J C, Gershman D J, Paterson W R, Saito Y, Strangeway R J. 2016. Kinetic evidence of magnetic reconnection due to Kelvin-Helmholtz waves. *Geophys Res Lett*, 43: 5635–5643
- Lin R L, Zhang X X, Liu S Q, Wang Y L, Gong J C. 2010. A three-dimensional asymmetric magnetopause model. *J Geophys Res*, 115: A04207
- Liu L, Chen Y, Le H, Kurkin V I, Polekh N M, Lee C C. 2011. The ionosphere under extremely prolonged low solar activity. *J Geophys Res*, 116: A04320
- Liu L, Chen Y, Le H, Ning B, Wan W, Liu J, Hu L. 2013. A case study of postmidnight enhancement in F-layer electron density over Sanya of China. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 4640–4648
- Liu L, Chen Y. 2009. Statistical analysis on the solar activity variations of the TEC derived at JPL from global GPS observations. *J Geophys Res-Space Phys*, 114: A10311
- Liu R, Yang H. 2012. Progress in polar upper atmospheric physics research in China. *Adv Polar Sci*, 23: 55–71
- Liu S Q, Gong J C. 2015. Operational space weather services in national space science center of Chinese Academy of Sciences. *Space Weather*, 13: 599–605
- Liu X, Liu W, Cao J B, Fu H S, Yu J, Li X. 2015. Dynamic plasmopause model based on THEMIS measurements. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 10543–10556
- Liu X, Xu J, Yue J, Liu H L, Yuan W. 2014. Large winds and wind shears caused by the nonlinear interactions between gravity waves and tidal backgrounds in the mesosphere and lower thermosphere. *J Geophys Res-Space Phys*, 119: 7698–7708
- Liu Y D, Luhmann J G, Kajdič P, Kilpua E K J, Lugaz N, Nitta N V, Möstl C, Lavraud B, Bale S D, Farrugia C J, Galvin A B. 2014. Observations of an extreme storm in interplanetary space caused by successive coronal mass ejections. *Nat Commun*, 5: 3481
- Liu Y D, Luhmann J G, Lugaz N, Möstl C, Davies J A, Bale S D, Lin R P. 2013. On Sun-to-Earth propagation of coronal mass ejections. *Astrophys J*, 769: 45
- Liu Y, Lei J H, Yu P C, Zhang Z K, Zhang X, Cao J X. 2017. Laboratory generation of broadband ELF waves by inhomogeneous plasma flow. *Geophys Res Lett*, 44: 1634–1640
- Liu Y, Zhang Z K, Lei J H, Cao J X, Yu P C, Zhang X, Xu L, Zhao Y D. 2016. Design and construction of Keda Space Plasma Experiment (KSPEX) for the investigation of the boundary layer processes of ionospheric depletions. *Rev Sci Instrum*, 87: 093504
- Liu Z X, Hu Y D. 1988. Local magnetic reconnection caused by vortices in the flow field. *Geophys Res Lett*, 15: 752–755
- Lu J Y, Liu Z Q, Kabin K, Zhao M X, Liu D D, Zhou Q, Xiao Y. 2011. Three dimensional shape of the magnetopause: Global MHD results. *J Geophys Res*, 116: A09237
- Lu Q M, Huang C, Xie J L, Wang R S, Wu M Y, Vaivads A, Wang S. 2010. Features of separatrix regions in magnetic reconnection: Comparison of 2-D particle-in-cell simulations and Cluster observations. *J Geophys Res*, 115: A11208
- Luan X, Lei J, Dou X, Dang T. 2016. Double crests of peak height in the equatorial ionospheric *F*₂ layer observed by COSMIC. *J Geophys Res-Space Phys*, 121: 529–537
- Ni B, Cao X, Shprits Y Y, Summers D, Gu X, Fu S, Lou Y. 2018. Hot plasma effects on the cyclotron-resonant pitch-angle scattering rates of radiation belt electrons due to EMIC waves. *Geophys Res Lett*, 45: 21–30
- Pu Z Y, Kivelson M G. 1983. Kelvin-Helmholtz instability at the magnetopause: Solution for compressible plasmas. *J Geophys Res*, 88: 841–852
- Pu Z Y, Korth A, Chen Z X, Friedel R H W, Zong Q G, Wang X M, Hong M H, Fu S Y, Liu Z X, Pulkkinen T I. 1997. MHD drift ballooning instability near the inner edge of the near-Earth plasma

- sheet and its application to substorm onset. *J Geophys Res*, 102: 14397–14406
- Pu Z Y, Zhang X G, Wang X G, Wang J, Zhou X Z, Dunlop M W, Xie L, Xiao C J, Zhong Q G, Fu S Y, Liu Z X, Carr C, Ma Z W, Shen C, Lucek E, Rème H, Escoubet P. 2007. Global view of dayside magnetic reconnection with the dusk-dawn IMF orientation: A statistical study for Double Star and Cluster data. *Geophys Res Lett*, 34: L20101
- Ren Z, Wan W, Liu L, Zhao B, Wei Y, Yue X, Heelis R A. 2008a. Longitudinal variations of electron temperature and total ion density in the sunset equatorial topside ionosphere. *Geophys Res Lett*, 35: L05108
- Ren Z, Wan W, Liu L. 2009. GCITEM-IGGCAS: A new global coupled ionosphere-thermosphere-electrodynamics model. *J Atmos Sol-Terrestrial Phys*, 71: 2064–2076
- Ren Z, Wan W, Wei Y, Liu L B, Yu T. 2008b. A theoretical model for mid- and low-latitude ionospheric electric fields in realistic geomagnetic fields. *Chin Sci Bull*, 53: 3883–3890
- Rong Z J, Barabash S, Futaana Y, Stenberg G, Zhang T L, Wan W X, Wei Y, Wang X D, Chai L H, Zhong J. 2014. Morphology of magnetic field in near-Venus magnetotail: Venus express observations. *J Geophys Res-Space Phys*, 119: 8838–8847
- Shen C R, Wang Y, Gui B, Ye P, Wang S. 2011. Kinematic evolution of a slow CME in corona viewed by STEREO-B on 8 October 2007. *Sol Phys*, 269: 389–400
- Shen C R, Wang Y, Wang S, Liu Y, Liu R, Vourlidas A, Miao B, Ye P, Liu J, Zhou Z. 2012. Super-elastic collision of large-scale magnetized plasmoids in the heliosphere. *Nat Phys*, 8: 923–928
- Shen C, Li X, Dunlop M, Liu Z X, Balogh A, Baker D N, Hapgood M, Wang X. 2003. Analyses on the geometrical structure of magnetic field in the current sheet based on cluster measurements. *J Geophys Res*, 108: 1168
- Shen C, Rong Z J, Dunlop M W, Ma Y H, Li X, Zeng G, Yan G Q, Wan W X, Liu Z X, Carr C M, Rème H. 2012. Spatial gradients from irregular, multiple-point spacecraft configurations. *J Geophys Res*, 117: A11207
- Shen F, Shen C, Wang Y, Feng X, Xiang C. 2013. Could the collision of CMEs in the heliosphere be super-elastic? Validation through three-dimensional simulations. *Geophys Res Lett*, 40: 1457–1461
- Shi Q Q, Tian A M, Bai S C, Hasegawa H, Degeling A W, Pu Z Y, Dunlop M, Guo R L, Yao S T, Zong Q G, Wei Y, Zhou X Z, Fu S Y, Liu Z Q. 2019. Dimensionality, coordinate system and reference frame for analysis of in-situ space plasma and field data. *Space Sci Rev*, 215: 35
- Shi Q Q, Zong Q G, Fu S Y, Dunlop M W, Pu Z Y, Parks G K, Wei Y, Li W H, Zhang H, Nowada M, Wang Y B, Sun W J, Xiao T, Rème H, Carr C, Fazakerley A N, Lucek E. 2013. Solar wind entry into the high-latitude terrestrial magnetosphere during geomagnetically quiet times. *Nat Commun*, 4: 1466
- Su Z, Zhu H, Xiao F, Zheng H, Wang Y, Shen C, Zhang M, Wang S, Kletzing C A, Kurth W S, Hospodarsky G B, Spence H E, Reeves G D, Funsten H O, Blake J B, Baker D N, Wygant J R. 2015. Disappearance of plasmaspheric hiss following interplanetary shock. *Geophys Res Lett*, 42: 3129–3140
- Sun T R, Wang C, Sembay S F, Lopez R E, Escoubet C P, Branduardi-Raymont G, Zheng J H, Yu X Z, Guo X C, Dai L, Liu Z Q, Wei F, Guo Y H. 2019. Soft X-ray imaging of the magnetosheath and cusps under different solar wind conditions: MHD simulations. *J Geophys Res-Space Phys*, 124: 2435–2450
- Sun T R, Wang C, Zhang J J, Pilipenko V A, Wang Y, Wang J Y. 2015. The chain response of the magnetospheric and ground magnetic field to interplanetary shocks. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 157–165
- Tang B B, Wang C, Guo X C. 2012. Bow shock and magnetopause contributions to the magnetospheric current system: Hints from the Cluster observations. *J Geophys Res*, 117: A01214
- Tian F, France K, Linsky J L, Mauas P J D, Vieytes M C. 2014. High stellar FUV/NUV ratio and oxygen contents in the atmospheres of potentially habitable planets. *Earth Planet Sci Lett*, 385: 22–27
- Tu C Y. 1988. The damping of interplanetary Alfvénic fluctuations and the heating of the solar wind. *J Geophys Res*, 93: 7–20
- Tu C Y, Marsch E. 1997. Two-fluid model for heating of the solar corona and acceleration of the solar wind by high-frequency Alfvén waves. *Sol Phys*, 171: 363–391
- Tu C Y, Zhou C, Marsch E, Xia L D, Zhao L, Wang J X, Wilhelm K. 2005. Solar wind origin in coronal funnels. *Science*, 308: 519–523
- Wan W, Liu L, Pi X, Zhang M L, Ning B, Xiong J, Ding F. 2008. Wavenumber-4 patterns of the total electron content over the low latitude ionosphere. *Geophys Res Lett*, 35: L12104
- Wan W, Yuan H, Ning B, Liang J, Ding F. 1998. Traveling ionospheric disturbances associated with the tropospheric vortexes around Qinghai-Tibet Plateau. *Geophys Res Lett*, 25: 3775–3778
- Wang C. 2010. New chains of space weather monitoring stations in China. *Space Weather*, 8: 08001
- Wang C, Graziella B R. 2018. Progress of solar wind magnetosphere ionosphere link explorer (SMILE) mission. *Chin J Space Sci*, 38: 657–661
- Wang C, Guo X C, Peng Z, Tang B B, Sun T R, Li W Y, Hu Y Q. 2013a. Magnetohydrodynamics (MHD) numerical simulations on the interaction of the solar wind with the magnetosphere: A review. *Sci China Earth Sci*, 56: 1141–1157
- Wang C, Han J P, Li H, Peng Z, Richardson J D. 2014. Solar wind-

- magnetosphere energy coupling function fitting: Results from a global MHD simulation. *J Geophys Res-Space Phys*, 119: 6199–6212
- Wang C, Richardson J D. 2004. Interplanetary coronal mass ejections observed by Voyager 2 between 1 and 30 AU. *J Geophys Res*, 109: A06104
- Wang C, Wang J Y, Lopez R E, Zhang L Q, Tang B B, Sun T R, Li H. 2016. Effects of the interplanetary magnetic field on the location of the open-closed field line boundary. *J Geophys Res-Space Phys*, 121: 6341–6352
- Wang C, Xia Z Y, Peng Z, Lu Q M. 2013b. Estimating the open magnetic flux from the interplanetary and ionospheric conditions. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 1899–1903
- Wang J S, Nielsen E. 2003. Behavior of the Martian dayside electron density peak during global dust storms. *Planet Space Sci*, 51: 329–338
- Wang R S, Lu Q M, Nakamura R, Huang C, Du A M, Guo F, Teh W, Wu M Y, Lu S, Wang S. 2016. Coalescence of magnetic flux ropes in the ion diffusion region of magnetic reconnection. *Nat Phys*, 12: 263–267
- Wang Y M, Ye P Z, Wang S, Xue X H. 2003. An interplanetary cause of large geomagnetic storms: Fast forward shock overtaking preceding magnetic cloud. *Geophys Res Lett*, 30: 1700
- Wang Y, Shen C, Wang S, Ye P. 2004. Deflection of coronal mass ejection in the interplanetary medium. *Sol Phys*, 222: 329–343
- Wang Y, Zhuang B, Hu Q, Liu R, Shen C, Chi Y. 2016. On the twists of interplanetary magnetic flux ropes observed at 1 AU. *J Geophys Res-Space Phys*, 121: 9316–9339
- Wei F S, Dryer M. 1991. Propagation of Solar flare-associated interplanetary shock waves in the heliospheric meridional plane. *Sol Phys*, 132: 373–394
- Wei F, Liu R, Fan Q, Feng X. 2003. Identification of the magnetic cloud boundary layers. *J Geophys Res*, 108: 1263
- Wei Y, Fraenz M, Dubinin E, Wan W, Zhang T, Rong Z, Chai L, Zhong J, Zhu R, Futaana Y, Barabash S. 2017. Ablation of Venusian oxygen ions by unshocked solar wind. *Chin Sci Bull*, 62: 1669–1672
- Wei Y, Pu Z, Zong Q, Wan W, Ren Z, Fraenz M, Dubinin E, Tian F, Shi Q, Fu S, Hong M. 2014. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction. *Earth Planet Sci Lett*, 394: 94–98
- Wei Y, Yao Z, Wan W. 2018. China's roadmap for planetary exploration. *Nat Astron*, 2: 346–348
- Wu K, Xu J, Wang W, Sun L, Liu X, Yuan W. 2017. Interesting equatorial plasma bubbles observed by all-sky imagers in the equatorial region of China. *J Geophys Res-Space Phys*, 122: 10596–10611
- Wu Z, Li T, Dou X. 2015. Seasonal variation of Martian middle atmosphere tides observed by the Mars Climate Sounder. *J Geophys Res-Planets*, 120: 2206–2223
- Xiao C J, Wang X G, Pu Z Y, Zhao H, Wang J X, Ma Z W, Fu S Y, Kivelson M G, Liu Z X, Zong Q G, Glassmeier K H, Balogh A, Korth A, Reme H, Escoubet C P. 2006. *In situ* evidence for the structure of the magnetic null in a 3D reconnection event in the Earth's magnetotail. *Nat Phys*, 2: 478–483
- Xiao F, Yang C, Su Z, Zhou Q, He Z, He Y, Baker D N, Spence H E, Funsten H O, Blake J B. 2015. Wave-driven butterfly distribution of Van Allen belt relativistic electrons. *Nat Commun*, 6: 8590
- Xiao Q M, Wang Z B, E P, Wang X G, Xiao C J, Ren Y, Ji H T, MAO A H, Li Y Y. 2017. Development of plasma sources for Dipole Research EXperiment (DREX). *Plasma Sci Tech*, 19: 15–20
- Xiao Z, Xiao S, Hao Y, Zhang D H. 2007. Morphological features of ionospheric response to typhoon. *J Geophys Res-Space Phys*, 112: A04304
- Xiong J, Wan W, Ding F, Liu L, Ning B, Niu X. 2013. Coupling between mesosphere and ionosphere over Beijing through semi-diurnal tides during the 2009 sudden stratospheric warming. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 2511–2521
- Xiong M, Davies J A, Feng X, Li B, Yang L, Xia L, Harrison R A, Hayashi K, Li H, Zhou Y. 2018. Prospective white-light imaging and *in situ* measurements of quiescent large-scale solar-wind streams from the *Parker Solar Probe* and *Solar Orbiter*. *Astrophys J*, 868: 137
- Xu J, Li Q, Yue J, Hoffmann L, Straka Iii W C, Wang C, Liu M, Yuan W, Han S, Miller S D, Sun L, Liu X, Liu W, Yang J, Ning B. 2015. Concentric gravity waves over Northern China observed by an airglow imager network and satellites. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 11058–11078
- Xu J, Wu X, Ma S, Tian M, Yu S, Yeh K C, Franke J S, Tsaoi W H, Lin K H. 2000. Tomographic imagine of ionospheric structures and disturbances in the region of East-Asian equatorial anomaly. *Sci China Ser E-Technol Sci*, 43: 395–404
- Xu R L. 1991. The displaced equatorial-neutral sheet surface observed by the ISEE-2 satellite. *J Atmos Terrestrial Phys*, 53: 1085–1090
- Xue X H, Dou X K, Lei J, Chen J S, Ding Z H, Li T, Gao Q, Tang W W, Cheng X W, Wei K. 2013. Lower thermospheric-enhanced sodium layers observed at low latitude and possible formation: Case studies. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 2409–2418
- Xun Y, Yang G, She C Y, Wang J, Du L, Yan Z, Yang Y, Cheng X, Li F. 2019. The first concurrent observations of thermospheric Na layers from two nearby central midlatitude lidar stations. *Geophys Res Lett*, 46: 1892–1899
- Yan Y, Wang W, Chen L, Liu F, Geng L, Chen Z. 2018. New

- interplanetary scintillation array in China for space weather. *Sun Geosphere*, 13: 153–155
- Yang H, Sato N, Makita K, Kikuchi M, Kadokura A, Ayukawa M, Hu H Q, Liu R Y, Häggström I. 2000. Synoptic observations of auroras along the postnoon oval: A survey with all-sky TV observations at Zhongshan, Antarctica. *J Atmos Sol-Terrestrial Phys*, 62: 787–797
- Yao Z H, Pu Z Y, Fu S Y, Angelopoulos V, Kubyshkina M, Xing X, Lyons L, Nishimura Y, Xie L, Wang X G, Xiao C J, Cao X, Liu J, Zhang H, Nowada M, Zong Q G, Guo R L, Zhong J, Li J X. 2012. Mechanism of substorm current wedge formation: THEMIS observations. *Geophys Res Lett*, 39: L13102
- Yi F, Zhang S, Yu C, He Y, Yue X, Huang C, Zhou J. 2007. Simultaneous observations of sporadic Fe and Na layers by two closely colocated resonance fluorescence lidars at Wuhan (30.5°N, 114.4°E), China. *J Geophys Res*, 112: D04303
- Yi W, Reid I M, Xue X, Murphy D J, Hall C M, Tsutsumi M, Ning B, Li G, Younger J P, Chen T, Dou X. 2018. High- and middle-latitude neutral mesospheric density response to geomagnetic storms. *Geophys Res Lett*, 45: 436–444
- Yi W, Reid I M, Xue X, Younger J P, Spargo A J, Murphy D J, Chen T, Dou X. 2017. First observation of mesosphere response to the solar wind high-speed streams. *J Geophys Res-Space Phys*, 122: 9080–9088
- Yu Y, Wan W, Ren Z, Xiong B, Zhang Y, Hu L, Ning B, Liu L. 2015. Seasonal variations of MLT tides revealed by a meteor radar chain based on Hough mode decomposition. *J Geophys Res-Space Phys*, 120: 7030–7048
- Yue X, Hu L, Wei Y, Wan W, Ning B. 2018. Ionospheric trend over Wuhan During 1947–2017: Comparison between simulation and observation. *J Geophys Res-Space Phys*, 123: 1396–1409
- Yue X, Schreiner W S, Zeng Z, Kuo Y H, Xue X. 2015. Case study on complex sporadic E layers observed by GPS radio occultations. *Atmos Meas Tech*, 8: 225–236
- Zhang H, Khurana K K, Kivelson M G, Fatemi S, Holmström M, Angelopoulos V, Jia Y D, Wan W X, Liu L B, Chen Y D, Le H J, Shi Q Q, Liu W L. 2016. Alfvén wings in the lunar wake: The role of pressure gradients. *J Geophys Res-Space Phys*, 121: 10698–10711
- Zhang J J, Wang C, Tang B B. 2012. Modeling geomagnetically induced electric field and currents by combining a global MHD model with a local one-dimensional method. *Space Weather*, 10: S05005
- Zhang M L, Liu L, Wan W, Ning B. 2014. An update global model of hmF2 from values estimated from ionosonde and COSMIC/FORMOSAT-3 radio occultation. *Adv Space Res*, 53: 395–402
- Zhang Q H, Zhang B C, Lockwood M, Hu H Q, Moen J, Ruohoniemi J M, Thomas E G, Zhang S R, Yang H G, Liu R Y, McWilliams K A, Baker J B H. 2013. Direct observations of the evolution of polar cap ionization patches. *Science*, 339: 1597–1600
- Zhang Q H, Zong Q G, Lockwood M, Heelis R A, Hairston M, Liang J, McCreia I, Zhang B C, Moen J, Zhang S R, Zhang Y L, Ruohoniemi J M, Lester M, Thomas E G, Liu R Y, Dunlop M W, Liu Y C M, Ma Y Z. 2016. Earth's ion upflow associated with polar cap patches: Global and *in situ* observations. *Geophys Res Lett*, 43: 1845–1853
- Zhang S D, Yi F, Huang C M, Huang K M, Gan Q, Zhang Y H, Gong Y. 2013. Latitudinal and altitudinal variability of lower atmospheric inertial gravity waves revealed by U.S. radiosonde data. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 7750–7764
- Zhang S, Yi F. 2004. A numerical study on global propagations and amplitude growths of large-scale gravity wave packets. *J Geophys Res-Atmos*, 109: D07106
- Zhang T L, Lu Q M, Baumjohann W, Russell C T, Fedorov A, Barabash S, Coates A J, Du A M, Cao J B, Nakamura R, Teh W L, Wang R S, Dou X K, Wang S, Glassmeier K H, Auster H U, Balikhin M. 2012. Magnetic reconnection in the near Venusian magnetotail. *Science*, 336: 567–570
- Zhang X Y, Zong Q G, Wang Y F, Zhang H, Xie L, Fu S Y, Yuan C J, Yue C, Yang B, Pu Z Y. 2010. ULF waves excited by negative/positive solar wind dynamic pressure impulses at geosynchronous orbit. *J Geophys Res-Space Phys*, 115: A10221
- Zhang Y, Xiong J, Liu L, Wan W. 2012. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the 8-year SABER/TIMED data. *J Geophys Res*, 117: D21101
- Zhao B, Wan W, Liu L. 2005. Responses of equatorial anomaly to the October–November 2003 superstorms. *Ann Geophys*, 23: 693–706
- Zhao B, Wan W, Reinisch B, Yue X, Le H, Liu J, Xiong B. 2011. Features of the F_3 layer in the low-latitude ionosphere at sunset. *J Geophys Res*, 116: A01313
- Zhao H, Ni B, Li X, Baker D N, Johnston W R, Zhang W, Xiang Z, Gu X, Jaynes A N, Kanekal S G, Blake J B, Claudepierre S G, Temerin M A, Funsten H O, Reeves G D, Boyd A J. 2019. Plasmaspheric hiss waves generate a reversed energy spectrum of radiation belt electrons. *Nat Phys*, 15: 367–372
- Zhao H, Wang J X, Zhang J, Xiao C J. 2005. A new method of identifying 3D null points in solar vector magnetic fields. *Chin J Astron Astrophys*, 5: 443–447
- Zhao L L, Zhang H, Zong Q G. 2017. Global ULF waves generated by a hot flow anomaly. *Geophys Res Lett*, 44: 5283–5291
- Zhong J, Wang W, Yue X, Burns A G, Dou X, Lei J. 2016. Long-duration depletion in the topside ionospheric total electron content during the recovery phase of the March 2015 strong storm. *J*

- [Geophys Res-Space Phys](#), 121: 4733–4747
- Zhong J, Wei Y, Pu Z Y, Wang X G, Wan W X, Slavin J A, Cao X, Raines J M, Zhang H, Xiao C J, Du A M, Wang R S, Dewey R M, Chai L H, Rong Z J, Li Y. 2018. *MESSENGER* observations of rapid and impulsive magnetic reconnection in Mercury's magnetotail. [Astrophys J](#), 860: L20
- Zhou X Z, Angelopoulos V, Sergeev V A, Runov A. 2010. Accelerated ions ahead of earthward propagating dipolarization fronts. [J Geophys Res](#), 115: A00I03
- Zhou X Z, Zong Q G, Pu Z Y, Fritz T A, Dunlop M W, Shi Q Q, Wang J, Wei Y. 2006. Multiple triangulation analysis: Another approach to determine the orientation of magnetic flux ropes. [Ann Geophys](#), 24: 1759–1765
- Zhou X Z, Wang Z H, Zong Q G, Rankin R, Kivelson M G, Chen X R, Blake J B, Wygant J R, Kletzing C A. 2016. Charged particle behavior in the growth and damping stages of ultralow frequency waves: Theory and Van Allen Probes observations. [J Geophys Res-Space Phys](#), 121: 3254–3263
- Zong Q G, Hao Y X, Zou H, Fu S Y, Zhou X Z, Ren J, Wang L H, Yuan C J, Liu Z Y, Jia X H, Quan L, Liu Y, Wang Y F. 2016. Radial propagation of magnetospheric substorm-injected energetic electrons observed using a BD-IES instrument and Van Allen Probes. [Sci China Earth Sci](#), 59: 1508–1516
- Zong Q G, Wang Y F, Zhang H, Fu S Y, Zhang H, Wang C R, Yuan C J, Vogiatzis I. 2012. Fast acceleration of inner magnetospheric hydrogen and oxygen ions by shock induced ULF waves. [J Geophys Res](#), 117: A11206
- Zou H, Wang J S, Nielsen E. 2005. Effect of the seasonal variations in the lower atmosphere on the altitude of the ionospheric main peak at Mars. [J Geophys Res](#), 110: A09311
- Zou H, Ye Y G, Zong Q G, Chen H F, Zou J Q, Chen J, Shi W H, Yu X Q, Zhong W Y, Wang Y F, Zhou X Z, Hao Y X, Chen X R, Jia X H, Xu F, Shao S P, Wang B, Hao X Y, Zhang X X. 2018. Imaging energetic electron spectrometer onboard a Chinese navigation satellite in the inclined GEO orbit. [Sci China Tech Sci](#), 61: 1845–1865

(责任编辑: 郑永飞)