

质谱计在行星系统与小天体探测中的应用

王馨悦^{1,2}, 孙越强^{1,2}, 李永平^{1,2}, 唐萍^{1,2}

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190)

摘要: 质谱计多次应用于行星系统和小天体的大气层与土壤吸附气体或挥发组分及其同位素含量探索, 是太阳系行星系统和小天体探测计划中的首选载荷之一。大气和土壤元素及其同位素组分探测对资源勘探、行星系统的宜居性、天体演化、起源及其重要事件的精准时间坐标研究等具有重要意义。质谱计已多次成功应用于火星、土星系、木星系、彗星等探测任务中开展大气环境探测。质谱计的探测对象主要包括太阳系行星、行星卫星如月球、木星伽利略卫星、土卫, 以及地外小行星和彗星。四极杆质谱计在当前的深空空间环境探测活动中应用最为广泛。利用四极杆质谱计除可用于探测稀薄天体大气与土壤析出气体外, 如增加抽真空能力的前端设计, 则具备探测稠密大气成分的能力。中科院空间中心研发的星载质谱计已多次成功应用于地球行星大气成分和密度探测。

关键词: 质谱计; 大气成分分析; 土壤成分分析; 深空探测

中图分类号: V447+.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)06-0522-07

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.06.004

引用格式: 王馨悦, 孙越强, 李永平, 等. 质谱计在行星系统与小天体探测中的应用[J]. 深空探测学报, 2017, 4 (6) : 522-528.

Reference format: WANG X Y, SUN Y Q, LI Y P, et al. The application of mass spectrometer in planetary system and small Solar system bodies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4 (6) : 522-528.

0 引言

质谱计对行星系统和小天体的大气层与土壤吸附气体或挥发组分及其同位素含量分析具有独特优势。气体和挥发物组分与同位素分析可以获取天体资源的分布信息、研究行星或卫星是否具备或提供生物生存的基本物质条件、揭示某些地质重大事件的历史、推演天体起源和早期形成过程、解释地球的起源和演变、并为太阳系演化提供有价值的信息等^[1]。根据观测对象的不同, 质谱计探测的物质组分通常包括氢、氧、氮、甲烷、稀有气体有机物、水及氢氧同位素、二氧化碳、氨、硫、卤族元素等挥发分。国际上执行过深空探测任务的质谱计类型包括了四极质谱计、磁偏转质谱计、飞行时间质谱计等^[2]。

磁质谱计根据带电粒子在磁场中所受洛伦兹力不同而实现离子分离, 其优点是质量分辨率好, 缺点是体积大、较重、可能会出现漏磁现象。飞行时间质谱计的原理是根据相同能量的离子在无场漂移管中飞行的时间长短来实现离子分离, 优点是测定快速、质量数分辨率高, 缺点是体积和重量都较大。四极杆质谱计质量轻、质量数分辨率较高, 对恶劣的

空间环境适应性强, 并且没有漏磁现象, 相对其它类型质谱计, 在近30年来的深空空间环境探测活动中应用最为广泛。

1 质谱计在行星系统与小天体探测中的应用历史

质谱计多次应用于行星系统与小天体探测计划, 涉及的天体包括了金星、火星、土星及土卫、木星、彗星、月球等大气或土壤的物质分析探测。下文介绍了近30年来典型深空探测任务的质谱计搭载情况。

1.1 “凤凰号”探测器

2008年登陆火星的“凤凰号”探测器搭载的热析出气体分析仪(Heat and Evolution of Gas Analyzer, TEGA)主要部件为磁偏转质谱计^[3], 如图1所示, 主要用于分析火星土壤的挥发性物质成分与基本元素同位素丰度比, 获取火星大气主要组成。该质谱计重4.3 kg, 平均功耗13 W, 质量数测量范围为0.7~4、7~35、14~70和28~140 amu。“凤凰号”探测器发现火星表面土壤的化学成分与地球上的海水非常相似, 为火星表面液态水可能维持生命存在的说法提供了证据。

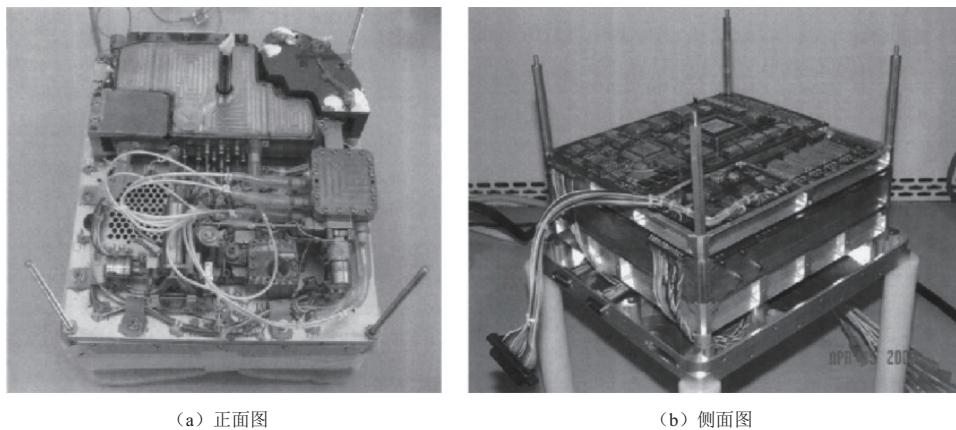


图1 “凤凰号”上的质谱仪的结构图

Fig. 1 Structure of mass spectrometer aboard Phoenix

1.2 火星大气与挥发演化探测器

美国的火星大气与挥发演化（Mars Atmosphere and Volatile Evolution, MAVEN）探测器是世界首颗专门研究火星大气的探测器^[4]，它揭示了火星大气逃逸机制，发现数10亿年间的太阳活动是火星大气层大量损失，形成干燥、寒冷星球的主要因素。MAVEN于2014年9月22日进入火星轨道，搭载的中性气体和离子质谱仪（Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer, NGIMS）为四极杆质谱计，质量数探测范围为2~150 amu，探测火星高层大气层以及一些元素的同位素比值，图2是其结构图。

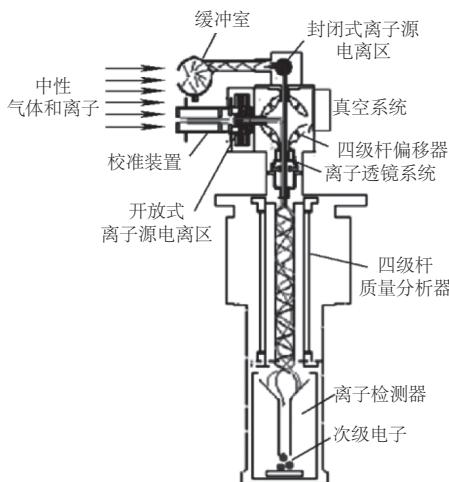


图2 火星大气与挥发演化探测器上的中性气体和离子质谱仪结构图

Fig. 2 Schematic of NGIMS aboard MAVEN

1.3 “罗塞塔号”彗星探测器

2004年发射的“罗塞塔号”探测器近距离环绕“丘留莫夫-格拉西缅科”彗星飞行^[5]，2014年11月13日，“罗塞塔号”搭载的菲莱登陆器成功登陆。轨道器携带了3台光谱仪，登陆器上携带了2台质谱计，它们的目标

是探测太阳系形成和生命起源的信息。离子和中性分子质谱分析仪ROSINA采用了双聚焦磁质谱仪和反射式飞行时间质谱仪，实物如图3~4所示，用于探测彗星的大气和电离层组成及挥发性物质，质量数探测范围分别为12~150 amu和1~350 amu，其中，双聚焦磁质谱仪的质量16 kg，平均功耗为19 W；反射式飞行时间质谱仪的质量15 kg，平均功耗30 W。“罗塞塔号”的探测表明彗星上的水和地球水不同源；分子氮的发现则暗示着太阳系在形成早期可能拥有某些生命分子。

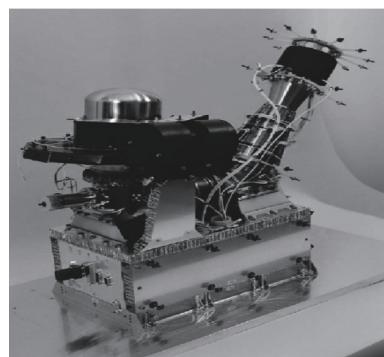


图3 “罗塞塔号”轨道器上的双聚焦磁质谱仪

Fig. 3 DFMS aboard Rosetta orbiter

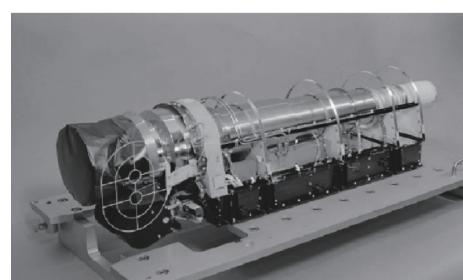


图4 “罗塞塔号”轨道器上的反射式飞行时间质谱仪

Fig. 4 RTOF-MS aboard Rosetta orbiter

1.4 木星“伽利略号”探测器

1995年12月，“伽利略号”探测器到达环木星轨道，搭载的四极杆质谱仪主要用于探测木星大气同位素^[6]，质量数探测范围分别为2~150 amu，质量为13 kg，平均功耗为13 W，实物如图5所示。

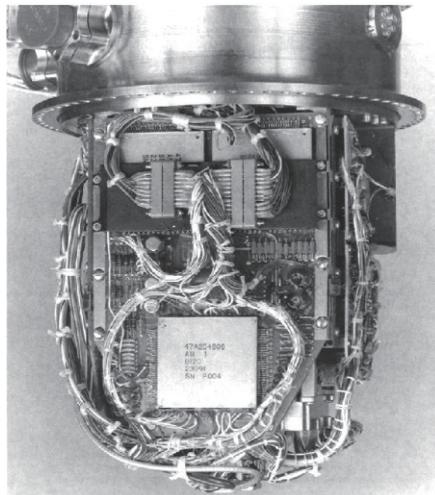


图5 “伽利略号”上的质谱仪
Fig. 5 Mass spectrometer aboard Galileo

1.5 土星“卡西尼号”探测器

1997年10月15日发射的土星“卡西尼号”探测器搭载的离子和中性粒子质谱仪（Ion and Neutral Particle Mass Spectrometer, INMS）是一台四极杆质谱计^[7]，用于探测土星附近的中性成分和低能离子，质量数探测范围1~99 amu，质量10 kg，平均功耗小于23 W。质谱计的原理见图6，实物如图7所示。

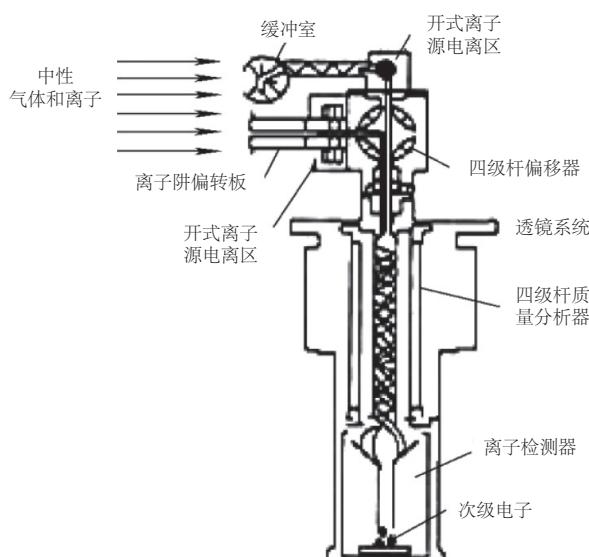


图6 “卡西尼号”上的质谱仪原理图
Fig. 6 Schematic of MS aboard Cassini

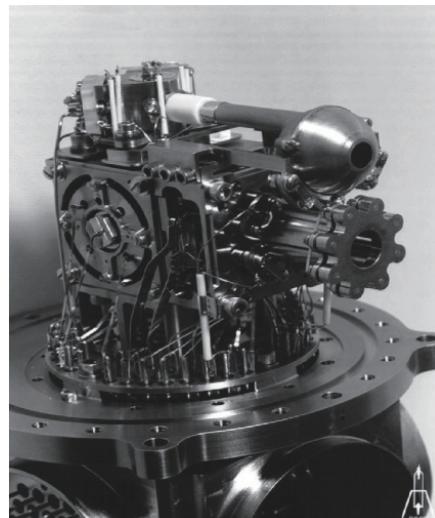


图7 “卡西尼号”上的质谱仪
Fig. 7 Mass spectrometer aboard Cassini

1.6 土卫6“惠更斯号”探测器

“惠更斯号”探测器于2004年7月进入土星轨道^[8]，并于2004年12月25日脱离母船“卡西尼号”飞向土卫6，搭载的气相层析质谱仪（Gas Phase Chromatography Mass Spectrometer, GCMS），其质谱部分为四极杆质谱计，用于探测土卫6的大气成分，其质量数探测范围为2~146 amu；质量为17 kg；平均功耗28 W，实物如图8所示。

1.7 月球大气月尘环境探测器

2013年9月6日发射的月球大气月尘环境探测器（Lunar Atmosphere and Dust Environment Exploration, LADEE）搭载的中性粒子质谱仪（Neutral Particle Mass Spectrometer, NMS）为四极杆质谱计^[9]，它用于探测月球稀薄大气成分，质量数探测范围为2~150 amu，质量为11 kg；平均功耗35 W，该质谱计在“卡西尼号”探测器INMS基础上改进而来，实物如图9所示。

2 探测对象分类与意义

当前，开展深空探测的目标地外天体主要包括太阳系行星、行星卫星、小天体等。行星卫星的探测热点则包括月球、木星伽利略卫星、土卫等，小天体探测热点包括小行星和彗星。

2.1 金星大气探测

金星大气层比地球大气层更为厚重与浓密，主要由二氧化碳（96.5%）、少量的氮（3.5%）和其他痕量气体组成，如图10所示。金星的云层从表面以上约50 km延伸到70 km左右，云层厚度极大，由硫酸液滴和其他腐蚀性化合物组成。金星大气层中大量的二氧化硫和水蒸汽、二氧化硫等气体造成金星表面剧烈的

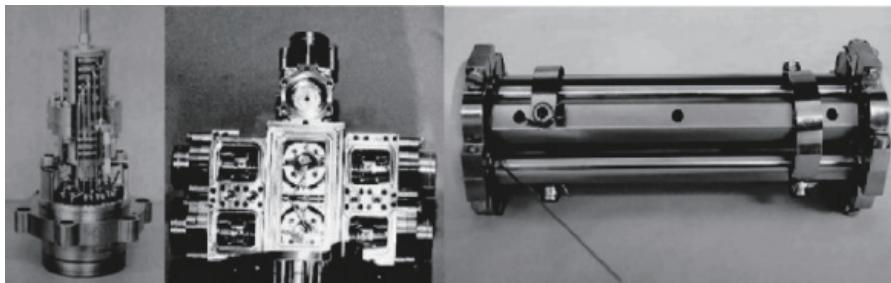


图8 “惠更斯号”上的质谱仪离子源和质量分析器

Fig. 8 Ion source and mass analyzer of mass spectrometer aboard Huygens

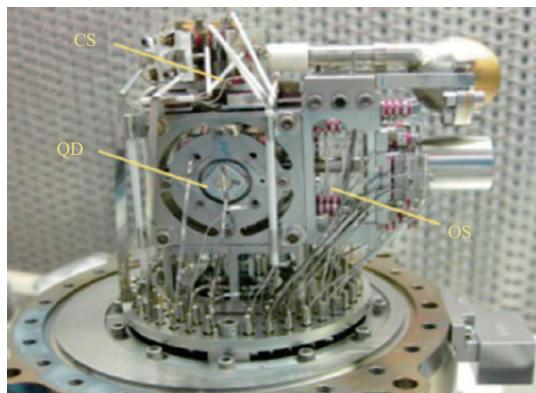


图9 LADEE的中性粒子质谱仪的传感器实物图，其中：OS是开式离子源、CS是闭式离子源、QD是四极杆

Fig. 9 The ion source assembly is shown on the top with the open source (OS), closed source (CS), and quadrupole deflector (QD)

温室效应，吸收了大量来自太阳的辐射能，使金星表面温度高达740 K (467 °C)。金星厚重的云层之上风速很高，可达300~400 km/h，随着高度降低，在50 km左右，风速降低到约200 km/h。金星的大气层受到超高速大气环流和超慢速自转影响，大气环流只需要4个地球日就可以环绕金星一周。金星大气探测的目标是获取惰性气体同位素与痕量气体及其同位素含量，研究金星起源和演化、温室效应的机制、大气动力学特征、类地行星比较学研究等。

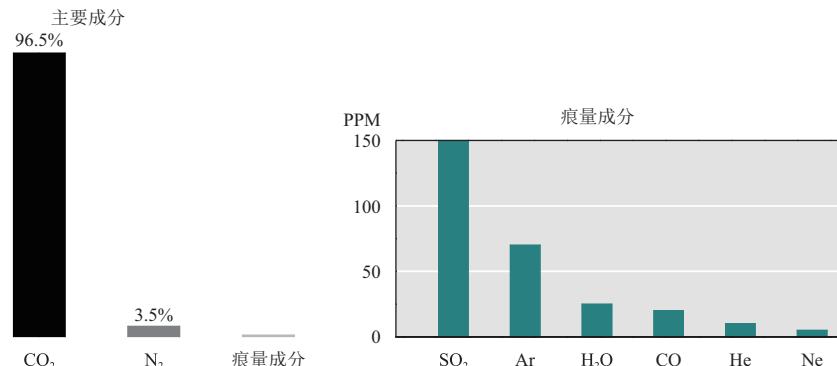


图10 金星大气成分含量，右图是不足10%的痕量元素含量

Fig. 10 The composition of the atmosphere of Venus and the <10% trace elements in the right

2.2 木星大气探测

木星是一颗气体行星，木星大气浓厚，延展5 000 km以上。木星大气缺乏明显的底层界限，且逐渐过渡到内部的流体外层，而没有类地行星那样的固态表面。根据温度随高度增加的情况，木星大气层分为对流层、平流层、热层和外大气层，与地球大气层不同，木星欠缺中间层。木星大气的主要成分（体积比率）是分子氢 (H_2 , $89.8 \pm 2\%$)，其次是氦 (He , $10.2 \pm 2\%$)；次要成分有甲烷、氨、乙烷、水（水冰），氘化氢；微量成分有硫化氢、氟、乙炔、磷化氢、一氧化碳等。木星的大气层显示广泛的活动现象，包括不稳定的带状物、旋涡（气旋和反气旋）、风暴和闪电。旋涡自身会呈现巨大的红色、白色或棕色的斑块，位于南半球的大红斑，是太阳系中已知最大的旋涡。可见的木星表面被划分成与赤道平行的一定数量带状区域，它们有两种类型：①色彩明亮的称为区；②相较之下较暗的称为带。木星的带状结构由大气层中成带的气流（喷流）分隔着。伽利略卫星的大气探测仪（再入器）只进入10 bar深度，大气更深处的结构、成分等都是未知的。木星大气的科学问题包括了木星带状结构的起源、大红斑这种巨大旋涡的起源；研究大气的颜色变化和扰动特征及其机制；木星大气的形成和演化；木星大气动力学理论；大气-电离层耦合的物理特征和机制等。

2.3 木星伽利略卫星的大气探测

木星的伽利略卫星具有稀薄大气层和电离层，表面大气压力 $\sim 10^{-6}$ Pa，一些观点认为木卫4可能具有比现有光谱观测或木卫1到木卫3更加浓厚的大气。木卫1是太阳系火山活动最剧烈的天体，喷发的气体尘埃可达到木星大气。木卫1的稀薄大气层主要由二氧化硫，还有氯化钠、一氧化硫及氧组成并富含火山气化物。木卫2具有主要由氧构成的稀薄大气。木卫2存在间隙性水汽喷发现象，羽状水冰喷泉高度可达200 km，喷发物散逸出的气体、尘埃颗粒物代表了木卫2的内部组成物质。木卫3存在稀薄的含氧大气（原子氧、氧和臭氧）。

2.4 月 球

月球是地球卫星和距离地球最近的天体，是人类走向深空的前哨站，开展月球表面环境和资源的探测对人类未来进入深空具有重要而深远的意义。月壤中的气体和挥发性物质是载人登月、生物在月球长期驻留主要的资源库，是研究月球演化、太阳系演化的重要数据资料。用质谱计探测月壤析出气体成分及其同位素丰度，可以对月表物质成分和资源进行勘查，特别是精确探寻月球水冰资源和He-3资源分布情况。获取月壤稀有气体、硫和卤族元素等挥发分及其同位素含量信息，为研究月球物质组成和演化过程、太阳活动、太阳系天体演化提供重要的线索。

2.5 小天体

利用质谱计探测小行星与彗星的表面气体或大气层、土壤析出气体，获取其元素成分和同位素丰度信息的主要科学目标是研究地球上水的起源、生命的起源、太阳系和宇宙的形成和演化等。小行星和彗星的形成时间与宇宙相当，记载着太阳系形成初期的信息，因此可以帮助我们认识地球的起源；地球生命可能起源于外太空，在地球的陨石发现了含有组成生命的有机物，小行星和彗星发现了水，探测小行星和彗星的水、含氮化合物、有机物等可以帮助人类认识生命的起源。

3 四极杆质谱计探测大气与土壤的方案

四极杆质谱计在当前的深空空间环境探测活动中应用最为广泛。利用四极杆质谱计探测天体大气与土壤析出气体可以获取天体的大气结构和成分与土壤析出气体成分。

鉴于深空探测计划对探测器小型化、低功耗、高可靠性的要求，四极杆质谱计可以设计为电子碰撞型离子源和四极杆质谱分析部分共同组成。由于四极杆质谱分析部分前端的离子源正常工作压力需要维持在

一定的真空中，利用质谱计探索相对较为稠密的大气（大于 10^2 Pa）与相对较为稀薄的大气（小于 10^2 Pa）应选择不同的探测方案，对于较为稀薄的大气，可以直接采用四极杆质谱计进行探测；对于较为稠密的大气，则需配置额外的抽真空系统，将传感器内的压强降低到质谱计可以工作的压强范围。根据深空探测任务的需求，中国科学院国家空间科学中心研制设计了满足深空探测计划中探测稠密行星大气、稀薄行星大气和土壤析出气体的四极杆质谱计，它的体积小、重量轻，功耗低、能谱范围 $1\sim 200$ amu，分辨率达 ~ 1 ppb。国家空间科学中心设计的稠密行星大气同位素质谱计如图 11 所示，该质谱计由质谱部分和抽真空系统组成，抽真空系统利用小型真空泵将系统内部压力降低到 10^{-2} Pa以下，它的重量小于7 kg。

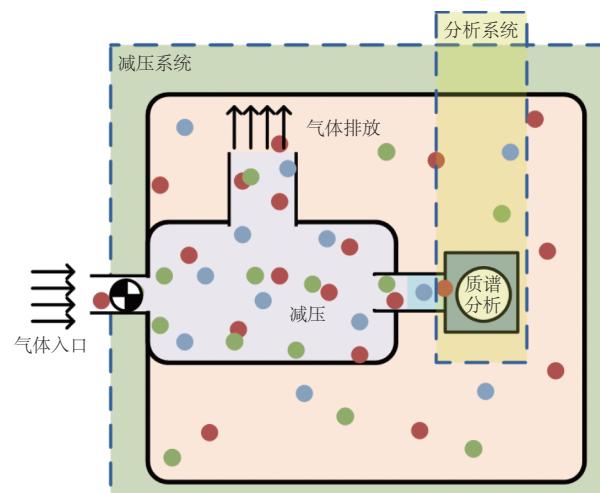


图 11 稠密行星大气同位素质谱计示意图
Fig. 11 The schematic of the mass spectrometer for the intensity atmosphere

利用四极杆质谱计探测天体的土壤析出气体则需要再引入土壤的取样机构和热解系统，其中的取样机构负责样品采集；加热装置负责样品加温使得土壤中的挥发性物质析出。国家空间科学中心设计的月壤热解气体分析仪，对特定区域开展月壤气体和挥发性物质元素含量和分布的就位探测，具有高时空分辨率和高精度、对平台资源需求较小的优势，特别在小尺度精细探测、稀有气体同位素丰度、重水的辩识等方面具有显著优势，垂直方向可以深入到月壤内部开展精密探查，可获得指定区域的气体和挥发性物质在月壤中的空间分布特征，寻找局部元素富集区。

4 我国质谱计发展

我国四级杆质谱技术已成功应用于星载大气成分探测器开展地球热层大气探测活动中并取得了丰硕的

成果。从2001年开始,中国科学院国家空间科学中心研制的基于四极杆质谱计的大气成分探测器开始在“神舟2号”“神舟3号”“神舟4号”飞船轨道舱上在轨监测地球热层大气成分的时空分布,获得了大量探测数据,积累了丰富的航天经验。随着技术的发展,大气成分探测器可用于卫星表面气体监测,并成功探测到卫星表面的污染气体(NH_3 、 H_2O 、NO等)。2011年10月发射的“天宫1号”和2015年9月发射的“天宫2号”目标飞行器上,配置了轨道大气环境探测器,用来监测大气密度

和成分变化。图12是“天宫2号”大气环境探测器在380 km高度探测的大气成分和表面污染气体质谱图,观测到了来自于航天器自身在轨初期的释放气体,包括水汽、氮气和二氧化碳。到目前为止,国家空间科学中心为地球热层大气探测研制的四级杆质谱计重量小于1 kg、功耗小于1 W、质量数探测范围1~100 amu、分辨率~1 ppb,可以安装在微纳卫星上,满足对地球热层大气成分含量精确测量和卫星表面释放污染气体监测的需求。

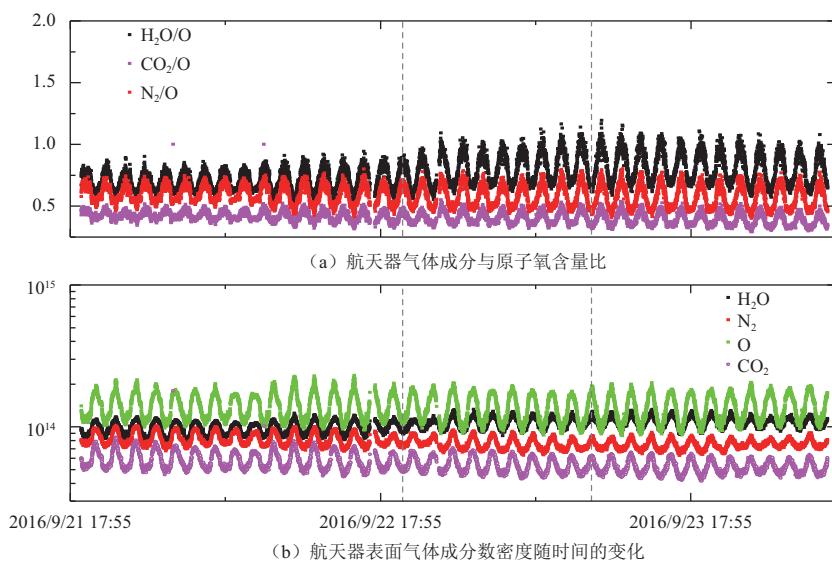


图12 “天宫2号”380 km表面气体环境中实测气体成分和含量随时间的演化及其对原子氧的含量比
Fig. 12 The atmosphere composition variation with time and the ratio to the oxygen by TG-2 in 380 km height

5 结束语

质谱计是人类探索地外天体、认识天体基本环境的首选载荷之一。应用于行星系统和小天体探测的质谱计的空间环境适应性、探测能力、小型化、低资源需求等使得它的结构和性能不同于地面使用的质谱仪器。利用质谱计获取地外天体大气和土壤元素及其同位素组分信息,对于天体的资源勘探、行星系统的宜居性、天体演化、起源及其重要事件的精准时间坐标研究等具有重要意义。过往数10年深空探测任务中,四极杆质谱计的应用最为广泛。随着人类走向深空的步伐不断加快,探测目标的变化,必将大力推动质谱计在空间应用技术方面的发展,使其在未来的深空探测中继续发挥重要作用。

参 考 文 献

[1] PALMER P T, LIMERO T F. Mass spectrometry in the U.S. space program: past, present, and future[J]. Journal of American Society for

Mass Spectrometry, 2001(12): 656-675.

- [2] 周志权,吕浩,张栋,等.质谱仪在深空探测中的应用[J].质谱学报,2015,36(6):492-505.
- [3] ZHOU Z Q, LYU H, ZHANG D, et al. Application of mass spectrometer in deep-space exploration[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometer Society, 2015, 36(6): 492-505.
- [4] HOFFMAN J H, GRIFFIN T P, LIMERO T, et al. Space applications of mass spectrometry [EB/OL]. (2010)[2017]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100039433.pdf>.
- [5] MAHAFFY P R, BENNA A M, KING T, et al. The neutral gas and ion mass spectrometer on the Mars atmosphere and volatile evolution mission[J]. Space Science Reviews, 2015(195): 49-73.
- [6] BALSIGER H, ALTWEGG K, BOCHSLER P, et al. Rosina-Rosetta orbiter spectrometer for ion and neutral analysis[J]. Space Science Reviews, 2007, 128(1/2/3/4): 745-801.
- [7] NIEMANN H B, HARPOLD D N, ATREYA S K, et al. Galileo probe mass spectrometer experiment[J]. Space Science Reviews, 1992(1-4): 111-142.
- [8] WAITE J H, LEVIS W S, KASPRZAK W T, et al. The Cassini ion and neutral mass spectrometer(INMS) investigation, The Cassini-Huygens mission[J]. Space Science Reviews, 2004(114): 113-231.

- [8] NIEMAN H, ATREYA S, BAUER S J, et al. The gas chromatograph mass spectrometer aboard Huygens[C]// Huygens: Science, Payload and Mission, Proceedings of an ESA Conference. [S.I.]: ESA, 1997, 1177: 85-108.
- [9] PAUL R M, RICHARD R H, BENNA M, et al. The neutral mass spectrometer on the lunar atmosphere and dust environment explorer mission[J]. Space Science Review, 2014(185): 27-61.
- 作者简介：
王馨悦(1977-),女,副研究员,主要研究方向:行星大气探测。
 通信地址:北京市中关村南二条一号中科院空间中心(100190)
 电话:(010)62586400
 E-mail: orchard@nssc.ac.cn

The Application of Mass Spectrometer in Planetary System and Small Solar System Bodies

WANG Xinyue^{1,2}, SUN Yueqiang^{1,2}, LI Yongping^{1,2}, TANG Ping^{1,2}

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
 2. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China)

Abstract: Mass spectrometer is one of the primary science payloads for deep space explorations. It has been used for the atmosphere and soil composition analysis of the planet system and the small Solar system body for many times. The composition and isotope abundant of the atmosphere and soil measurement can be used for the research of the resource prospection, inhabitability, celestial body evolution, origin and the history of the key geologic events. Mass spectrometer has been used for several times in deep space missions of exploring the atmosphere of Mars, Saturn system, Jupiter system and comets etc. The deep space objects detected by mass spectrometer are introduced. The quadrupole mass spectrometer is used widely in deep space exploration activities. It's not only used to detect the thin atmosphere and the adsorption gas of the soil but also to detect the dense atmosphere with the front design of the vacuum equipment. The spaceborne quadrupole mass spectrometer developed by National Space Science Center has been used widely in the detection of the component and density of the Earth atmosphere. Finally, the development trends of the MS technology are analyzed, including miniaturization, broaden spectrum and large dynamic count range.

Key words: mass spectrum; planetary atmosphere; planetary soil; space exploration

High lights:

- Mass spectrometer has been used in deep space exploration missions for the planet system and small Solar system bodies, analyzing the component of the atmosphere or the soil adsorption gases of Mars, Saturn system, Jupiter system and comets etc.
- Quadrupole mass spectrometer has been used the most widely in recent thirty years on human deep space exploration missions than other ones for its advantages of light weight, low consumption, high resolution, good environment adaptability and zero magnetic leakage.
- Spaceborne quadrupole mass spectrometer developed by National Space Science Center has been used widely in the detection for the component abundance of the Earth atmosphere and the pollution outgases of the satellite. The performance of the equipment is that the weight is less than 1 kg, the power consumption is less than 1 W, the mass number of 1~100 amu and the resolution of ~1 PPb.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]