

空间环境及其探测手段

黄朝晖 丁凯

一、近地空间环境

空间环境是除陆地、海洋和大气以外人类生存的第四个环境，与人类活动和发展息息相关。根据空间存在的物质、辐射和力场的时空分布特性，太阳系内的空间环境大致可分为行星际空间环境、地球空间环境和其他行星空间环境。地球空间，也就是近地空间，一般是指地球表面 20 ~ 30 km 以上的中高层大气、电离层、磁层是人类空间活动的最主要的区域，如图 1 所示。各种应用卫星，包括通信卫星、气象卫星、资源卫星以及导航和定位卫星等，都是在地球空间环境中运行的。同时，地球空间、行星际空间和太阳大气构成了日地空间环境。下面我们简要介绍地球空间环境。

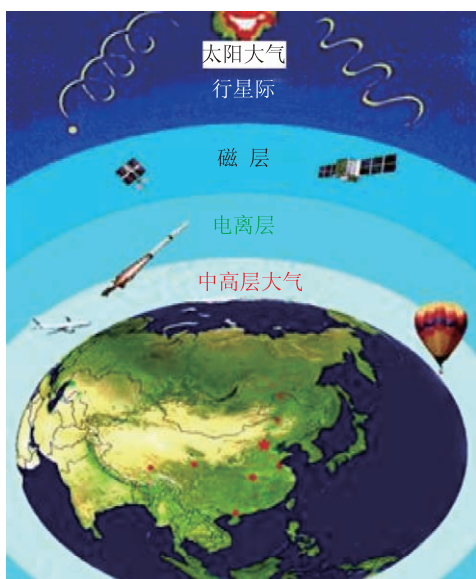


图 1 地球空间环境示意图

中高层大气：按照温度划分，大气层可分为对流层、平流层、中间层和热层，如图 2 所示。通常我们将对流层以上的地球大气总称为中高层大气。大部分天气过程，如云、雨、雪、雹等都发生在对流层。对流层上是平流层，保护地球生物免受紫外辐射的臭氧就在平流层；再往上是中间层，至 80 ~ 85 km 处中间层达到最低温度 -90°C ，这是大气层最冷的部分。平流层和中间层顶区是空间飞行器发射、回收的重要区域，对航天器发射、宇航员的安全以及回落点的精度有重要影响。中间层以上，温度再次随高度升高，这就是热层，热层是大气层最热的部分。在 250 km 高度以上的热层大气中，原子氧高达 80% 以上，对近地航天器有明显的侵蚀

效应，是重要的空间环境问题。

电离层：按照电离度的大小，大气可分为中性层、电离层和磁层，如图 2 所示。大约从距地面 60 km 处开始，太阳的电磁辐射和粒子辐射使大气的中性成分部分或全部电离，成为电子和正离子，构成电离层。电离层的电子浓度随高度而变化，还常出现几个极值区，称为“层”，有 D 层、E 层和 F (F_1+F_2) 层，见图 3。电离层的电子浓度还随昼夜、季节、纬度和太阳的活动而变化。电离层是直接影响人类活动的重要区域。电离层中有足够的电离成分，因而能显著影响地磁波的传播，造成电磁波的折射及能量损失。电离层能够影响短波通信，中、短波广播，特别是短波的全球传播，以及用于特殊目的的长波传播，如

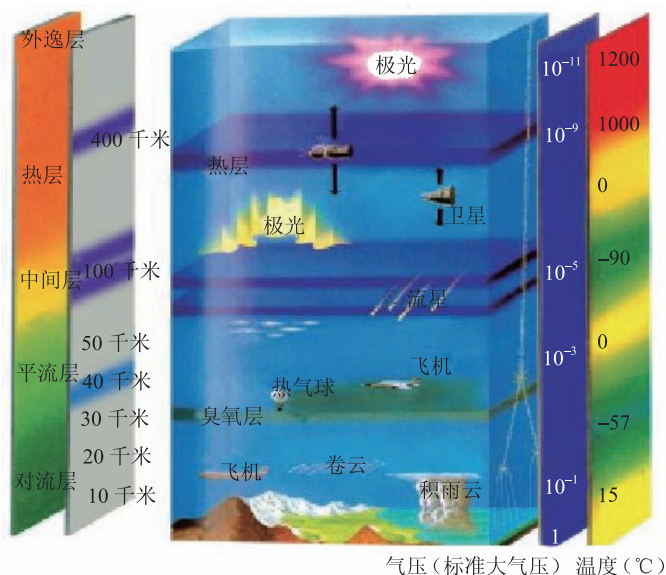


图 2 地球大气温度分层结构

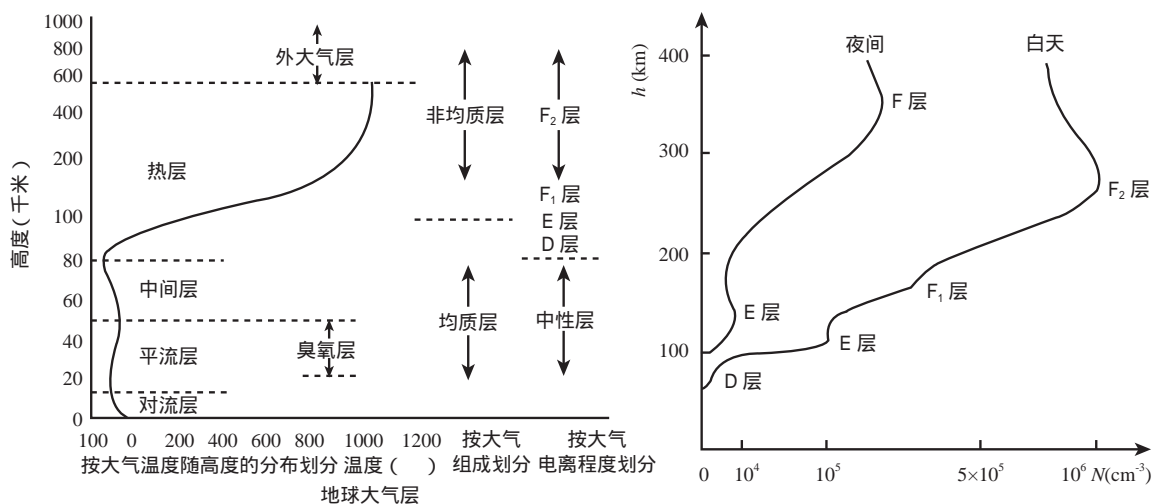


图3 左图为大气分层结构，右图为中纬度地区电离层电子浓度典型高度分布

全球导航信号等。几乎绝大部分应用卫星，如资源遥感卫星、气象卫星、航天飞机等主要在这一高度活动，其轨道稳定性及寿命依赖于这一高度的大气密度及其变化。

磁层：地球磁场近似于偶极子磁场。太阳风与地磁场相互作用，形成地球磁层，其外侧边界称为磁层顶。磁层顶的形状在朝向太阳的一侧很像一个略被压扁的半圆球，在日地连线方向上，向阳侧磁层顶离地心的距离约为8~11个地球半径（地球半径为6300多千米）。背向太阳的一侧有一个很长的近似于圆柱形的尾部，称为磁尾。磁尾可延伸至数百到上千个地球半径之外。地球磁层结构如图4所示。太阳风的扰动往往会引起地球磁层的剧烈变化，有时还会发生磁层暴和磁层亚暴。在磁层亚暴时，磁尾的等离子体片中会出现3~200 keV的高能等离子体，向地球注入时可以达到地球同步卫星的轨道高度。磁层中还存在着高能带电粒子，其相对密度较大的聚集区域称为地球辐射带，又称范艾仑辐射带。地球

辐射带分为内辐射带和外辐射带，内辐射带主要由能量为几到几十MeV的高能质子组成，外辐射带主要由能量为几十到几百keV的高能电子组成。辐射带高能粒子的通量较大，是引起航天器的一些材料、器件和人体辐射损伤的主要原因。

需要说明的是，中高层大气、电离层和磁层是相互耦合的。例如，60 km以下的大气（对流层、平流层和中间层）是电离层的下界，其中的环流及其变化所造成的大气成

分微小变化，可显著影响电离层底部的电离状况及热层的下边界条件；电离层向磁层提供一点点的电离成分，特别是一些重离子成分，而某些磁层过程使其中的带电粒子获得很高的能量，又可沿地磁力线沉降到高纬地区的电离层中。

地球空间环境是由太阳不断向外输出巨大的能量和物质与地球相互作用形成的。太阳耀斑和太阳物质抛射放出的电磁辐射带电粒子以及超音速运动的太阳风暴，会引

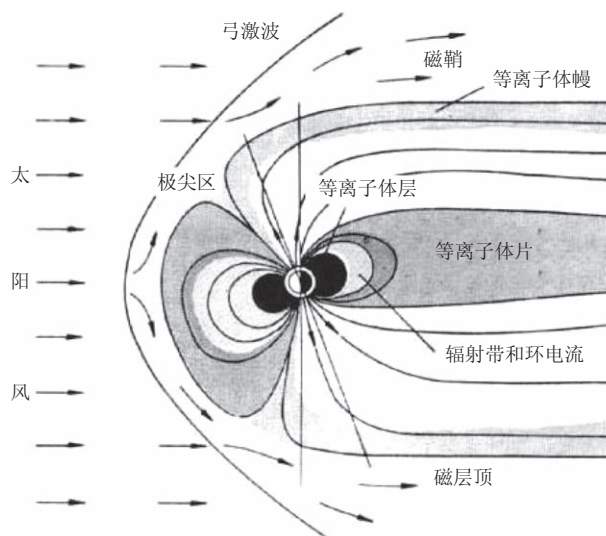


图4 地球磁层结构示意图

起地球空间环境的结构、密度、温度、运动状态、电磁状态、通信条件、光学特性、带电粒子分布等发生急剧变化，常常出现灾害性“空间天气”。“空间天气”是短时间尺度（分钟，小时，天量级）空间的状态或事件，也就是指太阳上和太阳风、磁层、电离层和热层中，影响空间、地面技术系统的运行和可靠性以及危害人类的健康和生命的状态。这些空间天气事件就像地球上的狂风暴雨一样，不但引起卫星运行的狂风暴雨一样，不但引起卫星运行、通信、导航以及电站输送网络的崩溃，造成地球上的通信中断，还可能危及人类的生命和健康，造成各方面的经济社会损失，见图5。此外，地球系统动力学过程，如地震过程和火山活动等，以及人类的

各种生产、空间和军事等活动也对地球空间环境施以重要影响。地球空间环境是现代人类航天、通信、导航定位和空间军事等高科技活动的重要场所，是空间科学探测与研究的主要空间范围。

二、空间环境的探测手段

地球空间环境的物理特性及其扰动变化与人类的经济、军事和科技活动密切相关，因此地球空间探测是人类空间探测的重点，同时也是研究空间天气的基础。太阳活动是地球空间环境变化的扰动源，太阳活动及日地空间系统耦合过程的探测研究是掌握地球空间变化规律的基础，因此人们常将地球空间探测与太阳、行星际探测联系起来，将日地空间系统作为整体进行探测研究。

1 中高层大气探测

中高层大气探测主要测量大气的压强、密度、成分、温度、风

场等参数，以及这些参数随空间和时间的变化等。中高层大气探测手段有地面观测，气球、火箭和卫星遥感三类。

主要的地面观测设备有中间层-平流层-对流层(MST)雷达、非相干散射雷达、激光雷达、光学干涉仪和倾斜滤光片光度计等。MST雷达是平流层、中间层大气风场和动力学特性资料的重要来源；非相干散射雷达可测量大气中的电离成分，通过与光学干涉仪的比对可间接反演出大气风场特性，其探测高度范围宽，是热层大气风场的重要观测手段；激光雷达除可进行大气密度、温度、微量成分等的主动探测外，还可实现大气风场高光谱分辨率观测；光学干涉仪是通过对气辉发射线轮廓的测量，利用多普勒频移原理和谱线多普勒增宽效应，反演热层和中间层顶区风场和温度；倾斜滤光片光度计是根据不同转动量子数气辉谱线相对强度随温度变化的经典光谱学方法，进行中间层顶区温度探测。

对中高层大气而言，特别是对高平流层以上到低热层高度，气球、火箭观测具有特殊优势。气球、火箭将探测仪器带到所要研究的高空高度上，可直接测量大气的基本参数。气球、火箭探测中高层大气在地域性、高空间分辨率方面是不可或缺的探测手段，同时也是认证中高层大气卫星遥感资料的重要方法。

卫星遥感中常见的探测仪器有大气密度探测器、大气成分探测器、原子氧探测器、大气辉光探测

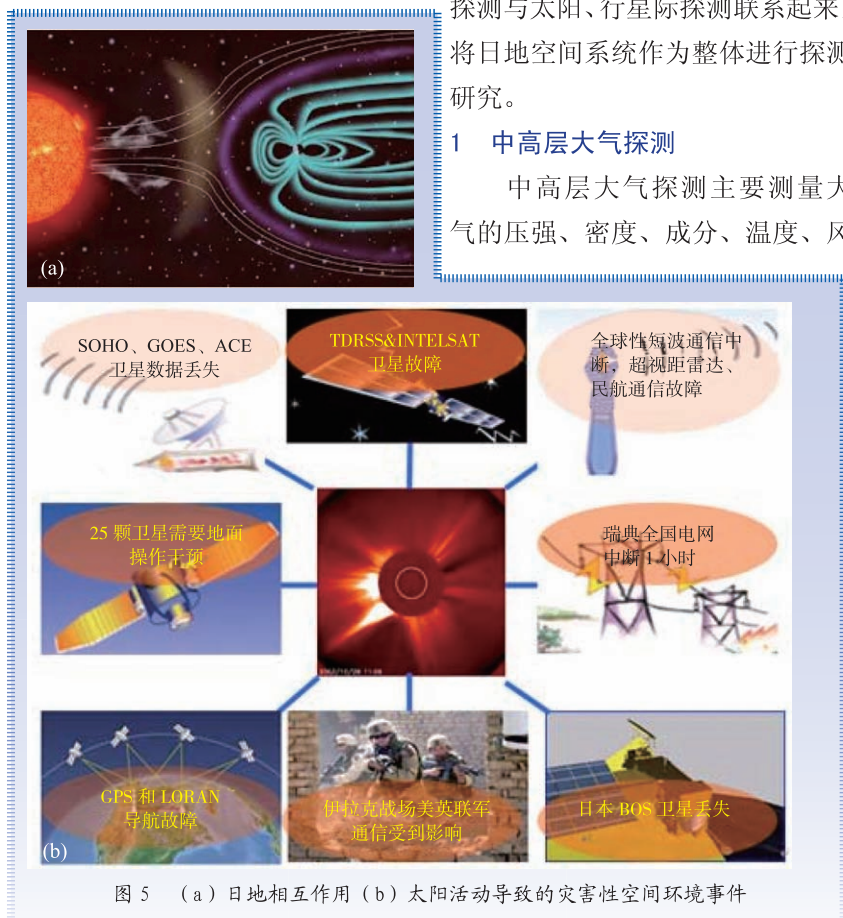


图5 (a) 日地相互作用 (b) 太阳活动导致的灾害性空间环境事件

器、气体污染探测器、紫外成像探测器等。

大气密度探测器通常采用电离计测量气体电离后的流强和气体温度来推算大气密度,如美国20世纪80年代的空间实验室的大气密度探测器、航天飞机 STS-1~4(即航天飞机 STS 执行的4次航天任务)的大气密度探测器均采用电离计测量,其优点是测量精度高。利用大气的阻力而产生的加速度也可测量大气密度,如2000年发射的德国 CHAMP 卫星的加速度计可测重力场和大气密度。大气密度的测量范围与卫星的运行轨道密切相关。

大气成分探测器通常采用质谱计进行探测,最常用的是四极质谱计,将大气分子、原子进行电离,通过荷质比区分离子成分,如1988年发射的美国 LDEF 卫星,1997年发射的 EOIM-3 卫星的质谱计。

高层大气的主要成分是原子氧,而原子氧对卫星的表面材料具有重要的影响。因此也有专门测量大气中的原子氧或通过原子氧的效应来推算原子氧的原子氧探测器。

太阳辐射中高层大气会产生气辉。通过气辉强度和光谱的测量可获得大气和电离层成分等信息,因此既有紫外线谱强度探测器,也有紫外成像探测器,如美国 OGO6 和 SNOE 卫星上气辉光度计、TIMED 卫星的全球紫外成像仪能对115~180 nm 的远紫外进行扫描成像。

卫星放气等造成的气体污染近些年逐渐引起重视,所以大气

污染探测器也经常使用。通常使用微质量计来测量大气污染带来的微小质量变化。在1995年发射的 STEP-3、EOIM-3、1998年发射的 STRV-2 等卫星上均装有微质量计。

对中低层大气的探测常选择红外波段和微波波段进行探测研究,如1992年美国发射的上层大气研究卫星 UARS 就采用了红外辐射探测器、低温临边阵列谱仪、微波临边探测仪等探测仪器。该卫星还采用大气 X 射线成像,测量进入大气的电子,用高分辨率多普勒成像仪测量中低层大气的风速。

2 电离层探测

对于电离层,主要测量电子、离子的密度、温度、速度,以及电场、磁场和等离子体波等参数,以及这些参数的空间和时间分布及变化。电离层探测手段也有地面无线电、火箭和卫星探测三类。

地面无线电探测设备最常用的是数字测高仪。数字测高仪可得到电离层频高图、回波场强、回波多普勒频移等数据,地面测高仪的不足在于得不到 F2 峰以上的信息。现在把测高仪小型化装载在卫星上,从上往下测量电离层,即可得到电离层 F2 峰以上的数据,如2000年美国发射的 IMAGER 卫星携带电离层 Topsonder 向下探测,测量顶部电离层到卫星间的电子密度剖面。另外,大功率雷达,如相干散射雷达和非相干散射雷达,也是探测电离层的强力手段。

从20世纪50年代开始,人们利用火箭和卫星对电离层进行了大量探测,通常有两类。

一类是使用仪器对电离层的某些参量进行直接测量,例如等离子体朗缪尔探针、光度计等。

朗缪尔探针是现场测量电子、离子密度和温度的最主要的仪器,其传感器形状包括柱形、球形和平板等多种。如美国20世纪90年代的 CRRES 卫星的朗缪尔探针就采用球形和柱形的两种天线,测量0.1~100 eV 的电子密度。为消除边缘效应,球形朗缪尔探针近些年得到广泛的应用,如2003年发射的欧洲 SMART-1 卫星也采用球形探针。

利用电离层离子与电子复合产生的紫外光,也可进行电离层探测。通常选择911 Å、1356 Å 等波段,避开其他气辉波段。台湾的 COSMIC 卫星上就安装了电离层紫外光度计。

另一类是卫星上安装的设备发射标准信号,之后依据电离层对电波传播效应,探测电离层参数。

利用美国的全球定位系统 GPS 是地面测量电离层电子总含量的最主要的方法。在低轨卫星上安装 GPS 接收机,利用无线电掩星可获得全球电离层电子密度随高度的分布,如台湾与美国合作的 COSMIC 卫星就用 GPS 掩星测大气和电离层,德国的 CHAMP、丹麦的 ORST、巴西的 SAO 等卫星都带有 GPS 接收机进行电离层和大气探测。

从卫星上发射标准信号地面接收,可测量电离层电子密度,以及电离层引起的闪烁、多普勒色散、法拉第旋转等,如 COSMIC 卫星设置有150 MHz、400 MHz、1067

MHz 三频信标仪。

3 磁层探测

磁层探测主要测量高能带电粒子、能量粒子、热等离子体和低温等离子体、电场、磁场及其波动等参数。

高能带电粒子探测仪器是应用最多的探测仪器，包括重离子探测器、高能质子谱仪、高能电子谱仪等，通常采用半导体、闪烁晶体等传感器。如 1992 年美国 SAMPEX 卫星的重离子探测仪器 MAST 测量了 He ~ Ni 的重离子成分及其所带电荷，能量范围为每核子几十到几百 MeV；质子和电子探测器分别测量 20 ~ 300 MeV 的质子和 1 ~ 30 MeV 的电子。美国 GOES 卫星的空间粒子探测器同时测量 0.8 ~ 700 MeV 的质子能谱、4 ~ 3400 MeV 的 α 粒子以及 0.6 ~ 4 MeV 的电子。美国大椭圆轨道的 CRRES 卫星也装有重离子成分探测器、高能电子流量计及高能质子望远镜等一批探测仪器。

中能粒子探测器测量的带电粒子能量通常在几十到几百 keV，采用半导体、时间飞行法等技术进行探测。如 CRRES 卫星的中能离子能谱仪，可测量 15 keV ~ 2 MeV 的质子及其他重离子，美国 NOAA 系列卫星中能质子和电子探测器也测量该能段的带电粒子。

低能粒子探测器测量能量更低的带电粒子，通常采用静电分析器加微通道板的方法进行探测。低能粒子探测通常是成像探测，常利用探测器的 2 维测量加卫星的自旋构成 3 维探测。如欧洲的 Cluster 卫星的电子电流仪 PEACE，测

量 0.59 ~ 26.4 keV 的电子谱；离子成分与分布分析仪 CODIF 测量 14 eV ~ 40 keV 的离子谱。美国 Polar 卫星的 TIMAS 测量 15 eV ~ 31 keV 的离子。

空间电场可用双探针，直接测量空间两点间的电位差来测量电场。如 CRRES 卫星的双朗缪尔探针，Cluster 卫星双探针电场仪。为保证电场测量的精度，两个探针的距离可达 100 m。空间电场还可以通过测量发射电子束的漂移运动来推算。美国 GEOS 卫星最早用电子漂移技术测量电场，欧洲的 Cluster 卫星也进行了这种探测。

地球空间磁场是影响带电粒子分布的主要因素，是空间环境研究最需要的参数。磁场的测量常用磁通门磁强计，也有线圈磁强计。如 CRRES、UARS、CHAMP、GEOS、Cluster 等卫星均安装有磁通门磁强计。一般测量精度随卫星轨道高度的增加而提高。通常需要卫星伸杆探测，以消除卫星本底的影响。

中性原子不受地磁场束缚，其信息反映了粒子的原始分布，可以用来磁层遥感观测。通常用偏转带电粒子保留中性原子的方法进行测量。如 Image 卫星安装了低能中性原子成像仪、中能中性原子成像仪和高能中性原子成像仪，用于对磁层的环电流等成像观测。

极光观测是对研究磁暴时粒子沉降等具有重要的意义。Image 卫星在远紫外和极紫外波段对极光区进行成像监测，Polar 卫星在可见光、紫外和 X 射线波段对极光进行探测。

等离子体波需电场分量和磁场分量分开测量，因此有电场天线和磁场天线。Polar 卫星使用 7 副电场和磁场天线进行测量。CRRES、Cluster 等卫星也装有等离子体波探测器。

4 空间环境效应等其他探测

空间环境对航天器的安全运行等具有重要的影响，因此在空间探测中空间环境的效应与试验也是很重要的一个方面。

辐射剂量是环境效应中最主要的探测内容。半导体类辐射剂量仪常服务于卫星的器件、材料等，而热释光剂量仪用于航天医学研究。在 CRRES 卫星上安放了大量的辐射剂量仪用于辐射剂量及在舱内分布的研究。

20 世纪 80 年代单粒子效应引起人们的重视。单粒子效应包括单粒子翻转、单粒子门锁等，空间试验主要研究各种器件在空间的单粒子翻转几率，验证各种防护措施。

在磁层内，航天器表面和深层充放电比较严重。探测器包括表面电位探测器、深层充电探测器等，其放电引起的电磁干扰也是测量的对象。1979 年美国发射的 P78-2 就安装有瞬态脉冲探测器、脉冲频率分析仪、充电电场效应分析仪、表面电位探测器，以及控制电位的离子喷射装置等；CRRES 卫星装有内部放电监测仪；美国 DMSP 等卫星进行过电位的主动控制试验；欧洲 Cluster 等卫星主动控制卫星表面电位，以保证粒子探测的精度。

美国 LDEF 卫星携带了 10 000 种材料样品，在暴露空间和屏蔽状

态下进行试验,分析了空间原子氧对表面材料的剥蚀、卫星气体污染等效应。

空间碎片的危害在逐年增加,大的碎片主要靠地面光学和雷达观测,中小空间碎片需天基观测。溅射等离子体探测器、半导体探测器、压电薄膜探测器等均可对小空间碎片进行探测。返回的暴露材料、航天飞机表面也是研究空间碎片的重要途径。

5 太阳与行星际探测

太阳是日地空间系统的扰动源头,太阳的活动变化直接影响着地球空间环境,因此太阳物理的探测研究更偏重太阳活动研究,特别是影响地球空间的各种活动。早期的轨道太阳观测台、太阳峰年卫星,20世纪90年代后的Yohkoh、Ulysses、SOHO、TRACE、ACE、HESSI等科学卫星,GOES等应用卫星等均对太阳进行观测。受地球大气吸收影响、在地面不能探测的太阳高能电磁辐射,是空间太阳探测的最主要的方面。美国GOES系列卫星从早期的太阳X射线流量计发展到近些年的太阳X射线成像仪,是诊断太阳高能电磁辐射的标准数据。Yohkoh卫星的软X射线望远镜在太阳高能物理研究中发挥了重要的作用。2002年发射的高能太阳分光成像仪卫星也在X和 γ 波段对太阳进行成像观测。

SOHO卫星的太阳极紫外成像仪(The Extreme Ultraviolet Imaging Telescope, EIT)在紫外波段对太阳成像,发现EIT波(太阳日冕波)等太阳活动先兆;日冕

诊断分光计、太阳紫外辐射监测仪等对太阳紫外谱进行监测。太阳紫外辐射流量监测对研究电离层和高层大气扰动具有重要意义。美国GOES等卫星增加了太阳紫外流量的长期监测。

太阳日冕也是地面难以观测的内容。SOHO卫星携带了大角度分光日冕仪。

太阳磁场探测可掌握太阳磁场的复杂变化,是开展太阳活动预报的基础。现有太阳磁像仪等专用太阳磁场探测的仪器。

利用太阳表面的各种波模的振荡可了解太阳内部结构。SOHO卫星就携带了整体低频振荡测量仪、太阳照度和重力振荡探测仪、迈克耳孙多普勒成像仪等仪器。

太阳风是行星际必测的内容。SOHO携带太阳风各向异性探测仪,Ulysses有太阳风等离子体探测器、太阳风离子成分探测器等,ACE有太阳风离子成分探测等。

太阳高能带电粒子探测也是常测的对象,Ulysses、SOHO、ACE等卫星均安排了大量的高能电子、质子及重离子的探测仪器,在Ulysses等卫星上还安排了行星际的等离子体波探测。行星际磁场是行星际研究的基础,在ACE、Ulysses等卫星上均安排有磁强计等磁场探测仪器。

6 我国的空间环境探测

我国空间环境探测已有很长的历史。火箭探测始于1958年,以其作为发展我国航天事业的起步,并在1960年9月首次试验成功。卫星探测方面,从1971年发射“实践一号”卫星开展高能带电粒子、

太阳X射线和磁场探测研究以来,我国陆续发射了“实践二号”、“大气一号”、“实践四号”、“实践五号”、“风云一、二号”、“双星计划”、“嫦娥”、“神州”系列飞船等多个航天器,进行了高层大气、高能粒子、空间环境效应等多方面的空间探测。在地面探测方面,地磁(电)观测就已有一百多年的时间,地面光学、无线电的观测历史也比较长。

在我国地基探测中,国家重大科技基础设施项目——东半球空间环境地基综合监测子午链(以下简称“子午工程”)是世界仅有的跨度最长(跨越地球纬度范围达 130°)、功能最全、综合性最高的子午监测链。子午工程将我国东经 120° 、北纬 30° 附近的15个综合性观测台站建成一个以链为主、链网结合的监测体系,运用无线电、地磁、光学和探空火箭等多种探测手段,涉及非相干散射雷达、高频相干雷达技术、中高层大气激光雷达技术、行星际闪烁探测技术、全天空干涉成像技术等多项前沿关键技术,连续监测地球表面 $20\sim 30\text{ km}$ 以上到几百千米的中高层大气、电离层和磁层,以及十几个地球半径以外的行星际空间中的环境参数。其科学目标是了解空间环境中的灾害性空间天气的变化规律,逐步弄清我国东经 120° 子午链附近和 30°N 纬度链上空空间环境的区域性特征和全球变化的关系,与天基探测相结合,建立相应的空间天气因果链模式,发展综合性的预报方法,做出有重要原始性创新的科学成

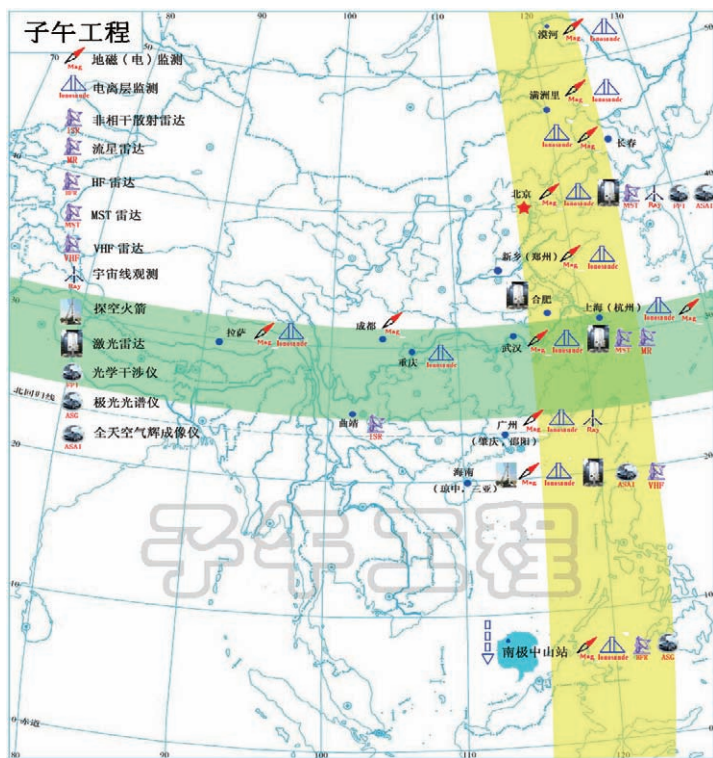


图 6 子午工程台站分布及监测空间范围

果。子午工程的台站分布及监测空间范围如图 6 所示。

关于子午工程的详细信息，请参见子午工程总工程师、空间天气学国家重点实验室主任王赤研究员在美国著名杂志 *Space Weather* 发表的文章“New Chains of Space Weather Monitoring Stations in China” (<http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2010SW000603.shtml>)。

三、结束语

空间已经被普遍认为是地球除陆地、海洋、大气之外的第四环境。“空间天气”与人类活动和发展息息相关；探测空间环境、预测空间环境扰动随之成为 21 世纪国家技术、社会和经济发展的一个重要目标之一。

(本文部分内容参考王世金研究员的《空间环境探测技术的现状和发展趋势》。本文部分图片来自网络收集，来源不详，仅供科普之用，特此致谢图片的原作者。)

(北京中国科学院国家空间科学中心 100190)

作者简介

黄朝晖，博士，中国科学院国家空间科学中心研究员、国家空间天气科学中心(筹)科学运行中心总协调人，空间天气学国家重点实验室数值预报模式研发与演示系统技术负责人，子午工程主任设计师，中国计算机学会高性能计算专业委员会常务委员、中国软件行业协会数学软件分会常务理事，中科院院长优秀奖获得者。