

# 子午工程谱写我国地基空间环境监测三部曲

王 赤<sup>1,2</sup> 徐寄遥<sup>1,3</sup> 李 晖<sup>1,3</sup> 陈志青<sup>1\*</sup> 丁 凯<sup>1</sup>

王江燕<sup>1</sup> 任丽文<sup>1</sup> 刘正宽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家空间科学中心 100190; 2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院 100049;

3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院 100049)

## 1. 人类生存和发展的“第四环境”

随着科学技术的高速发展,人类活动逐渐超越了陆地、海洋和低层大气的限制,向着更广袤的日地空间延伸。日地空间是当前人类航天活动、空间开发利用及空间军事活动的主要区域,是与人类生存和发展息息相关的“第四环境”。一般来说,日地空间环境是指地表20~30 km(平流层顶)以上直至太阳表面的广阔区域,涵盖了物理性质不同的中高层大气、电离层、磁层、行星际空间和太阳日冕等五大圈层,是由太阳不断向外输出的巨大能量和物质与地球大气相互作用而形成的。

类似于地球天气是地球大气环境中短时间尺度的变化,太阳上出现一系列爆发现象,如耀斑和日冕物质抛射等,会引起日地空间环境的等离子体、磁场、辐射、电离层及中高层大气等空间环境状态变化,我们形象地称之为“空间天气”。在开发和利用空间的过程中,人类要面对灾害性空间天气事件的威胁和影响。突发的、灾害性的空间天气变化,有时会使卫星运行、通信、导航和地面的一些基础设施遭到破坏,影响天基和地基国民经济基础设施的正常运行和可靠性,甚至危及人类的健康和生命,进而导致多方面的社会经济损失。了解日地空间环境特征,揭示日地空间天气链锁变化过程及其变化规律,提升空间天气预报水平是抢占空间天气科技制高点、满足国家战略需求和人民利益的迫切要求。

近年来,空间环境基础研究方面的重大突破加

深了人们对日地空间环境特征和变化规律的认识和理解。然而,一些重要的科学问题,如日地空间环境中的各种宏观与微观交织的非线性相互作用、近地空间不同圈层间的耦合过程,以及严重的空间天气事件对地球空间环境和人类活动的影响机理,我们还没有完全了解,仍旧是当今自然科学最富挑战的国际前沿之一。由于缺乏空间环境监测的体系化建设,我国自主的空间环境预报保障能力依旧薄弱,最重要的体现之一是关键数据源严重依赖于国外的探测数据,应对空间灾害性天气的自主能力有限。这首先对我国空间环境的监测能力和水平提出了更高的迫切需求。

## 2. 空间环境地基探测

为了更好地进出空间、利用空间,首先要认识空间,掌握空间环境的变化规律至关重要,而开展空间环境探测则是其前提和基础。空间环境监测主要分为天基监测和地基监测两种方式。天基探测多采用卫星等飞行器在空间进行探测,既能实现遥感探测,也能通过就位探测实现身临其境。但受到轨道、重量、功耗、寿命的种种限制,天基探测远不能满足时空变化极为复杂的空间环境研究的需要。相比之下,地基监测因其具有“5C”(continuous 连续、convenient 方便、controllable 可控、convincing 可信、cheap 便宜)的优越性,一直备受各空间大国青睐,是天地一体化空间环境监测体系中的重要组成部分,可以获得对一个区域连续、多参量、实时、稳

定的长期监测数据。

对于日地空间环境监测而言,地基监测是最古老的、也是持续时间最长的探测手段。人类很早就从极光、地磁场等易于观察的现象开始了地基监测和研究。到了近代,科学家们逐渐开始利用各种地面监测设施对中高层大气、电离层、磁层、行星际进行监测。

日地空间环境的范围极其广泛,需要测量的参量多种多样(包括密度、温度、速度、磁场、电场、宇宙线通量、不规则体等等),各类参量变化幅度的跨度也非常大(比如,从中高层大气到行星际空间,密度变化超过20个量级)。因此地基探测设备的种类

非常多。根据工作原理和探测对象,大致可将它们归类为地磁(电)设备、光学设备和无线电设备。

地磁(电)设备又可分为地磁场设备、地电场设备和大气电场设备。它们的工作原理、探测参量不尽相同,但都有一个共同的特点,就是探测的空间范围局限在一个点,即就位探测,而非遥感探测。例如,质子磁力仪<sup>[1]</sup>利用质子在磁场中的拉莫尔进动效应测量仪器所在位置的磁场总强度,大气电场仪<sup>[2]</sup>利用金属板在电场中产生感应电荷的原理测量垂直地面的电场。虽然这类测量是局地的,但数据的特征和变化都可与大范围的空间环境变化建立联系。磁场的短时变化来源于空间电流体系的

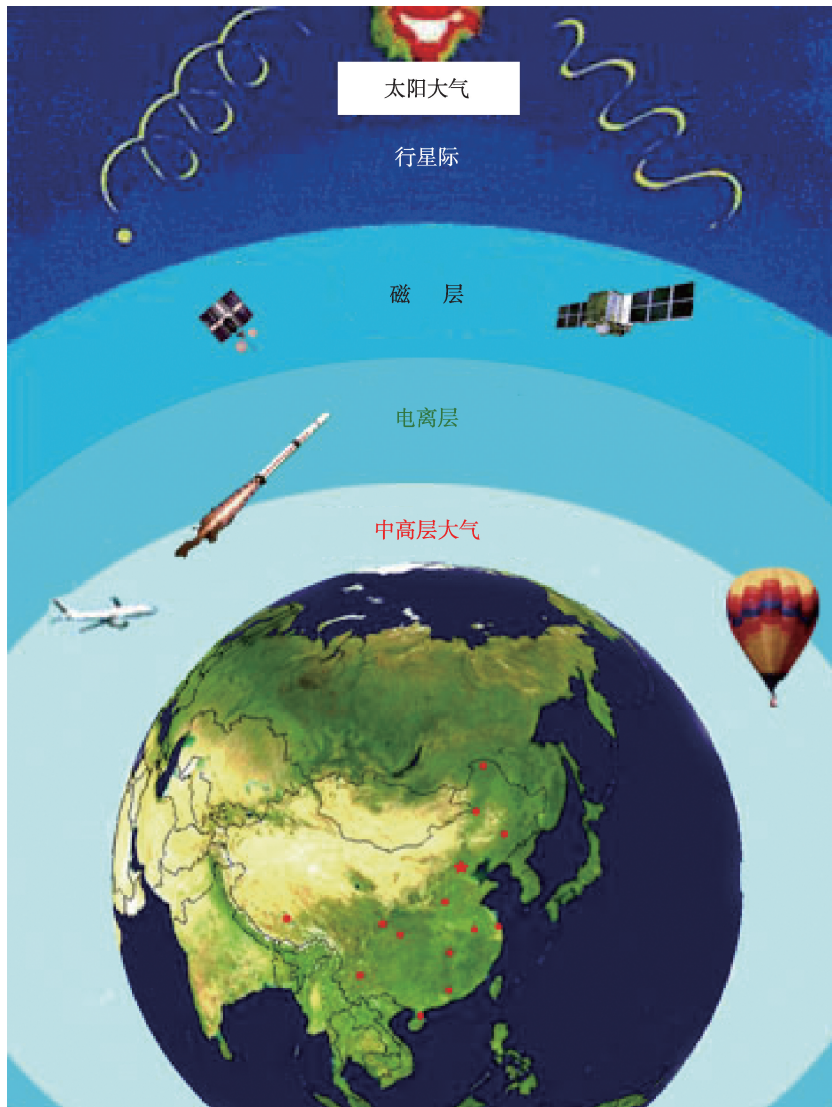
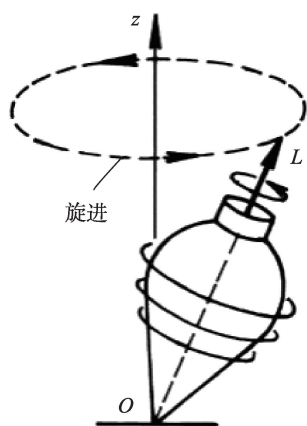


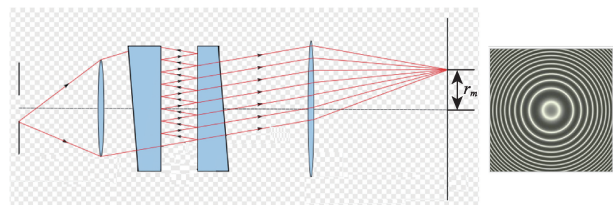
图1 日地空间环境示意图(图片来源于网络,有所修改)

图2 质子磁力仪测量原理<sup>[1]</sup>

变化,大气电场与电离层电势和大气电导率分布相关等。

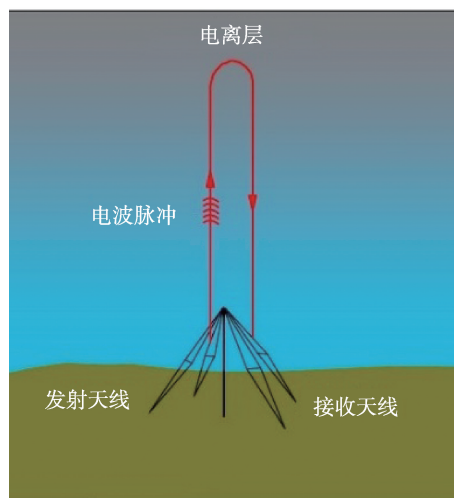
光学探测设备在空间环境探测中也起着重要作用。它们可以分为主动光学设备和被动光学设备。主动光学设备如激光雷达<sup>[4]</sup>,通过主动向空间发射激光束,利用望远镜接收不同高度的反射和散射光,从而计算大气的密度、温度、风场等参数。被动光学设备则接收来自探测对象本身的辐射来实现探测目的。在太阳光学观测方面,人们发展了多种太阳光学设备,针对特定的谱线,通过滤波、偏振、多普勒频移、塞曼效应等原理和方法,可以获取太阳的单色像、磁场、速度场等信息<sup>[5][6]</sup>。另一个适用被动光学探测的领域是中高层大气。通过对气辉、极光等大气辐射进行成像、多普勒测量,可以获取大气波动、风场等信息<sup>[7]</sup>。例如,利用法布里-博罗干涉仪测量气辉的多普勒效应,通过获得的干涉圆环反演大气运动的速度和温度,如图3所示。这些光学探测设备在空间环境探测中发挥着重要作用,为研究和掌握空间环境变化的规律提供了重要数据和信息。

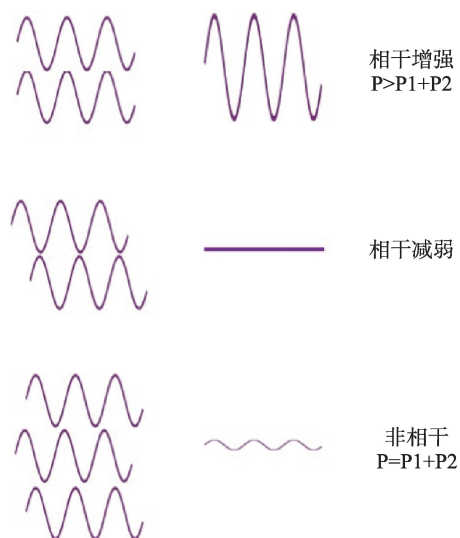
由于等离子体对电磁波传播产生深远影响,无

图3 光学干涉测量原理<sup>[1]</sup>

线电设备的主要探测对象是富含等离子体的电离层。光学设备主要探测空间的中性成分,而无线电设备主要探测空间中的带电粒子(等离子体)。与光学设备类似,无线电设备也可分为主动和被动两类。主动无线电设备具有发射和接收装置,通常体积和功率较大;而被动无线电设备只具备接收装置。电离层作为一种电磁波传播介质,其对电波的折射和吸收取决于电子密度、电波的波长以及电波的入射角。当电子密度足够高时,会导致电磁波无法继续传播,发生全反射现象。电离层测高仪<sup>[8]</sup>利用不同频率的电磁波在不同高度(对应不同的电子密度)被反射的原理,可以测量电离层电子密度随高度的分布。

在电离层不规则结构的边缘,电磁波会发生散射增强现象。如果不规则结构的尺寸大致为电磁波波长的一半,那么前后边缘散射的电磁波会相互叠加,形成相干散射现象。相干散射雷达可以利用这一现象来测量不规则结构的分布以及它们的运动速度等参数。与相干散射不同,由大量电子独立散射引起的回波是不相干的,被称为非相干散射<sup>[9]</sup>。非相干散射的回波信号非常微弱,但可以被用来获取电离层的电子密度、电子温度、离子温度、离子速度等非常丰富的信息,并且可以达到很高的时空分辨率。因此,国内外相关研究机构投入大量经费建设超大功率、超大口径的非相干散射雷达,以开展

图4 电离层测高仪的测量原理<sup>[1]</sup>

图5 相干散射与非相干散射<sup>[9]</sup>

电离层探测。这些雷达可以提供关于电离层结构和动态的详细信息,对于理解电离层的特性以及对通信和导航系统的影响具有重要意义。

对于可以穿透电离层的电磁波,如GNSS(全球导航卫星系统)卫星导航信号,其传播时间受到介质折射率的影响,即电波传播会被介质延迟。这种延迟与电磁波频率相关。通过被动接收来自GNSS卫星的两个频率信号,可以解算出传播路径上的总电子含量(TEC, Total Electron Content),实现对电离层的穿透式探测。类似地,穿透式探测也可用于行星际空间和太阳风。所有的天体都是电磁辐射体。远距离天体发射的电磁波在穿过太阳风到达地面的过程中受到太阳风的扰动,引起接收信号的闪烁,即行星际闪烁(IPS)。利用行星际闪烁测量结合一定的模型假设,可以推测太阳风的速度、密度等参数<sup>[10]</sup>。

来自天体的在无线电(极低频波到毫米波)频率范围内的电磁波,习惯于被称为射电波。因此,相关的探测方式也称为射电探测。通过射电探测,可以对太阳进行特定波段的成像,或对特定波段的辐射流量进行测量。只有特定频率范围的电磁波才能穿透地球大气层和电离层,地基射电探测就是利用了这些穿透窗口。通过这些探测方法,可以获得关于太阳、太阳风以及远距离天体的重要信息,有

助于深入理解宇宙空间的特性和动态。

### 3. 子午工程一期

我国的空间环境地基监测经历了从零星观测到综合集同的发展途径<sup>[11]</sup>。子午工程是我国空间科学领域的首个国家重大科技基础设施,旨在建设一个综合性的地基空间环境监测系统。我国空间物理学家早在1993年就提出了子午工程的科学构想,经过几代人的努力,子午工程最终从构想变为现实。1997年国家科技教育领导小组确定子午工程为国家重大科学工程。2005年国家发改委批复了东半球空间环境地基综合监测子午链项目建议书,子午工程正式立项。2006年国家发改委正式批复子午工程可行性研究报告,并明确采取分步走的发展战略。2008年,子午工程一期开工建设;2012年,子午工程一期通过国家验收,正式投入运行。

地球的磁力线大致沿经线(子午线)分布,空间天气事件一般都沿磁力线传播和演化,而随着地球的自转,利用子午线上的台站的联合探测可以实现对空间环境进行扫描观测,类似于给地球空间环境做CT。子午工程一期利用东经120°子午线附近(北起漠河,经北京、武汉,南至海南并延伸到南极中山站),北纬30°附近(东起上海,经武汉、成都,西至拉萨)的15个观测台站,共建设了87台不同类型的监测设备,采用地磁(电)、无线电、光学等手段,可连续监测地球表面20 km到几百千米高度的中高层大气、电离层和磁层,以及十几个地球半径以外的行星际空间。

子午工程一期运行至今已经历了一个太阳周(11年),为提升我国空间环境研究和应用水平作出了重要贡献。在研究方面,子午工程取得了一系列突破,主要集中在对我国空间环境区域特征的研究、空间天气扰动的传播规律以及不同空间圈层之间的物质和能量耦合等方面<sup>[12]</sup>。例如,子午工程的电离层监测设备探测到了地震期间的电离层波动,研究结果展示了岩石圈-大气-电离层之间的耦合

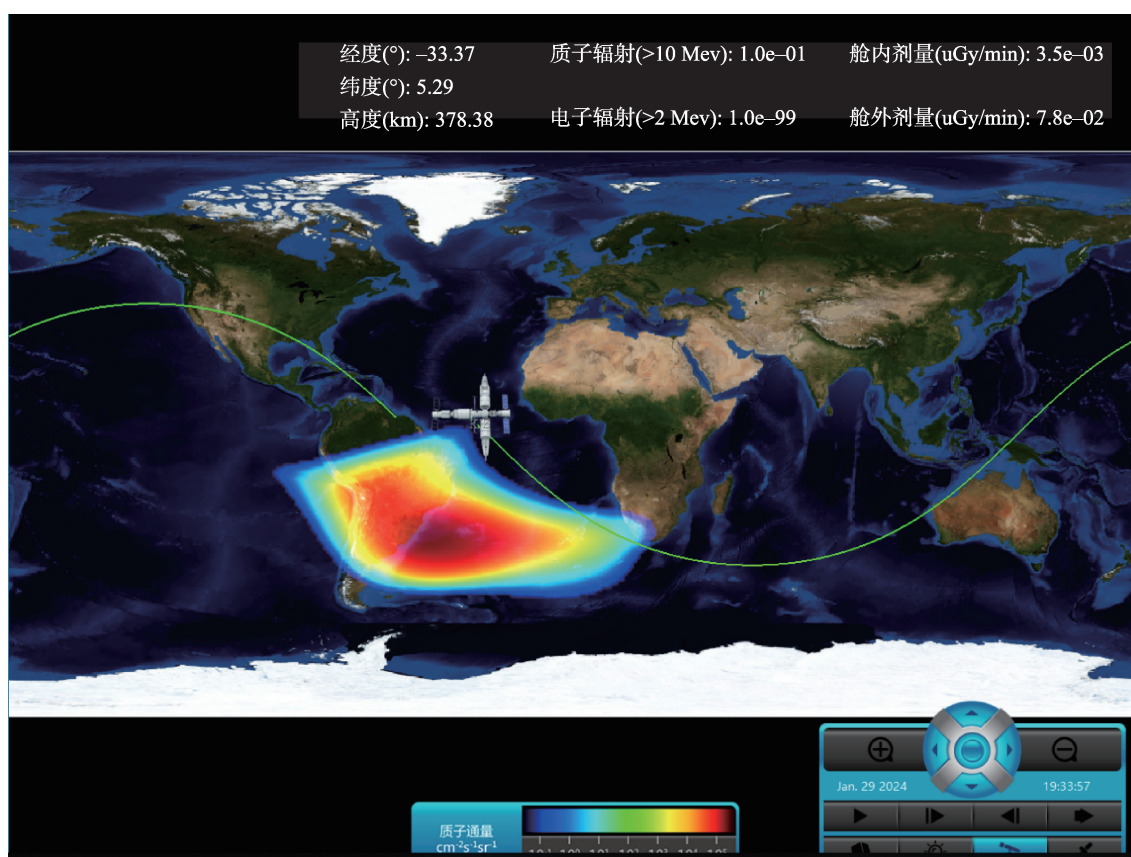


图6 基于子午工程数据和模式开展空间站在轨运行保障(中国科学院空间环境预报研究中心提供)

关系,以及大气和电离层波动的传播过程<sup>[13][14]</sup>。在应用方面,子午工程一期为我国重要的空间环境预报保障单位(国家气象局空间天气监测预警中心、中国科学院空间环境预报研究中心等)提供了自主数据,大幅提升了我国空间环境保障的自主性。例如,利用子午工程一期数据开发了我国区域电离层闪烁指数模型、区域三维电子密度同化模型、地磁的Kp和Dst等指数现报模型,应用于载人航天、深空探测等多项国家重大任务的保障中,为我国重要的空间基础设施的稳定运行保驾护航。

#### 4. 子午工程二期

子午工程一期从无到有建立了我国自主的空间环境监测链,然而也存在局限性:(1) 监测范围主要集中于我国东部的经济发达地区,对西部地区的监测能力不足,特别是西北部还是空白;(2) 观测站点之间的间距普遍大于500 km,难以胜任中小尺度

物理过程的监测和研究;(3) 覆盖的圈层局限于地球空间,缺少对空间天气源头太阳以及行星际空间的监测能力;(4) 大多采用常规监测设备,单机探测能力有限。在开展原创性的科学研究和满足国家重大需求方面还有差距。因此,空间环境地基综合监测网(子午工程二期)<sup>[15]</sup>应运而生。2018年子午工程二期作为国家重大科技基础设施获得国家发改委批复,并于2019年开工建设。目前,工程已经完成工艺验收,预期于2024年完成国家验收。之后子午工程一期和二期将形成完整的子午工程空间环境监测体系开始运行。

子午工程的科学目标是通过从太阳大气到近地空间全链条、全国覆盖、高时空分辨的多圈层多参量监测,探索空间天气事件的传播、演化和对我国空间环境影响的路径和规律;揭示我国不同区域上空的空间环境的变化特征和差异,以及青藏高原和南海等特殊区域空间环境变化的精细过程;研究

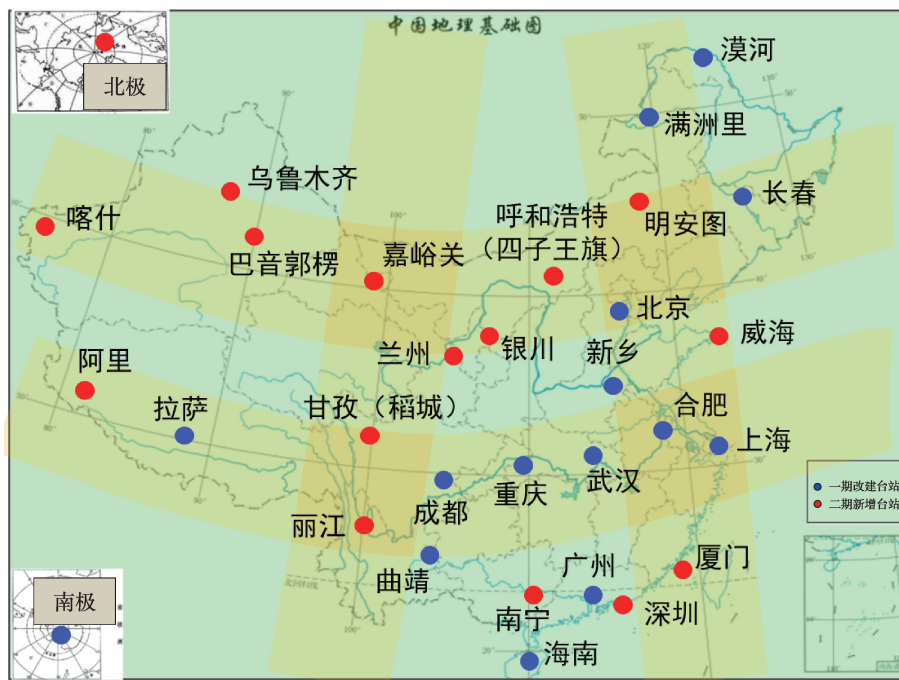


图7 子午工程(含一期、二期)观测台站布局

我国特殊地质和地理条件下,固体地球、低层大气和近地空间环境的耦合过程。

为满足全国范围覆盖、全圈层覆盖、立体式探测的需求,子午工程二期在一期基础上新增了16个台站,并提高一期台站的综合探测能力,形成沿东经100°、120°、北纬40°、30°两纵两横式布局的31个台站、282台监测设备的空间环境监测系统。

子午工程由空间环境监测系统、数据通信系统和科学应用系统三大系统组成。

空间环境监测系统中,在子午工程一期的基础上,子午工程二期新增了一系列先进的太阳-行星际监测设备,形成对日地空间全链条的监测能力(“一链”);采用地磁、无线电、光学等手段,对我国区域的电离层、中高层大气、地磁形成网络化的监测能力(“三网”);在极区高纬、北方中纬、海南(南方)低纬、青藏高原4个重点区域建设国际先进的大型监测设备,开展对空间环境的精细“显微”探测(“四聚焦”)。这种“一链、三网、四聚焦”的架构将使得子午工程首次实现对日地空间环境全圈层、多要素综合的立体式探测。子午工程的总体监测架构如图8所示。

### ● “一链”——太阳-行星际监测链

太阳作为日地空间环境扰动的源头,对太阳以及行星际空间的观测对理解太阳爆发的物质和能量传输规律至关重要。

基于太阳辐射频率随日心距下降的原理,太阳-行星际监测链采用光学、射电、IPS等多种手段递次接力、互相衔接的方式,形成了对太阳爆发活动从太阳表面到近地空间全过程进行追踪的能力。这种全链条的监测能力有助于我们更全面地理解太阳活动对地球空间环境的影响,从而提高对空间天气的预测和预警能力。

### ● “三网”——地磁监测网、电离层监测网以及中高层大气监测网

我国地域广阔,地磁、电离层、中高层大气等地球空间环境在我国境内表现出丰富的变化特性和地域特色。为了更好地了解我国空间环境的背景分布特征、空间天气事件的扰动传播特性,以及由于地形和地理条件造成的空间环境的区域特殊性,子午工程采用“两纵两横”式布局监测设备,构成了

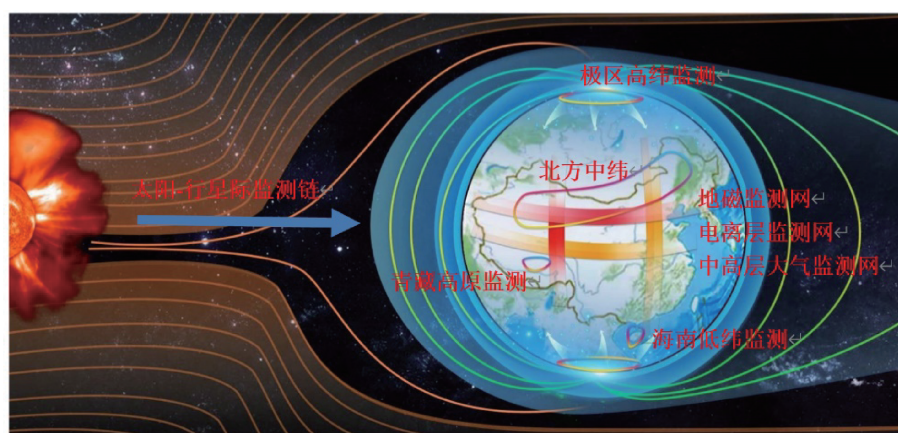


图8 子午工程监测架构(一链、三网、四聚焦)

覆盖地磁、电离层和中高层大气的监测台网。

### ● “四聚焦”——对关键区域、特色区域开展重点监测

**极区高纬地区:**地球的极区由于磁场的特殊构型,形成了太阳风直接进入磁层的天然窗口,是空间天气、空间物理研究的理想场所。子午工程二期充分利用我国在南北极区的科学站点资源,针对电离层、中高层大气、极光、地磁与波动配置监测设备。极区的扰动可以沿子午线向低纬地区传播,对中低纬地区空间环境造成重要的影响。

**北方中纬地区:**我国地处中低纬地区,来源于北极地区的空间天气扰动往往是经过俄罗斯和蒙古国广袤地区,再传播到我国境内。对空间天气扰动从极区到中低纬地区传播的整个路径进行监测不仅可以完整地描绘扰动传播的规律,研究空间环境南北耦合机制,对空间天气的预报预警也十分重要。子午工程二期在该区域布局三个台站组成的高频雷达阵列,开展对电离层大范围的扫描探测,形成对我国空间环境上游区域大纵深的遥感探测能力,同时构成极区监测与国内监测之间的“桥梁”,形成高、中、低纬有机衔接的完整监测体系。

**青藏高原地区:**青藏高原作为地球的“第三极”,具有独特的地理环境和复杂的大气扰动,是岩石圈-大气层-电离层垂直耦合研究的热点区域。子午工程二期聚焦“岩石圈/低层大气层-中高层大

气垂直耦合”过程,对“第三极”中高层大气开展综合观测,实现自地表到低热层高度范围大气温度、风场、密度、金属层,以及低层大气多要素的高时空分辨的“全高度覆盖”的“显微”观测。

**海南(南方)低纬地区:**我国南部海南岛地处电离层赤道异常区,电离层活动异常频繁,是观测研究地球低纬电离层环境的理想区域。同时,电离层扰动严重影响我国南海地区的短波通信。我国对南海地区的空间天气保障需求极为迫切。子午工程二期在该区域建立国际上先进的大型无线电和光学观测设备,综合探测我国海南岛周边及南海上空 80 km 到上千千米的中高层大气、电离层和内磁层的空间环境精细结构。

子午工程的最大特点是其完整的日地空间综合体系,使其具备对日地空间进行端对端的整体探测研究能力。子午工程二期新增了一系列探测能力国际领先的大型监测设备,将在空间物理和空间天气基本物理问题的深入研究方面发挥重要作用,其中包括全球最大的综合孔径太阳射电望远镜——圆环阵太阳射电成像望远镜(建设于四川稻城),以及全球首个低纬地区三站式非相干散射雷达和首次实现 1000 km 高度大气探测的激光雷达(建设于海南)。这些子午工程二期标志性设备将引领国际空间环境地基监测。

另外,为了实现监测网络的科学高效运行和多学科综合监测数据的集成融合,促进重大科研应用

成果的产出,子午工程二期还建设了数据通信系统,以完成数据实时汇集、加工和分发服务;同时还建设了科学应用系统,以完成科学运行管理、研究与建模支撑、预报方法研究以及空间环境监测数据交叉应用示范等任务。这两个系统的主体设施均部署于北京怀柔的子午工程综合信息与运控中心。

## 5. 国际子午圈大科学计划

以子午工程为基础,我国科学家立足国内,胸怀全球,提出和推动国际子午圈大科学计划(International Meridian Circle Program, IMCP)<sup>[16]</sup>。该计划将联合跨越东经120°、西经60°子午圈沿线的十余个国家或地区的千余台仪器形成全球分布式地基探测网络,与天基探测卫星相结合,研究空间天气的全球特征和传播规律,以及与全球变化的相互影响,为应对地球灾害和国家空间安全决策提供科学依据,为建设宜居地球和实现人类可持续发展贡献中国力量。

空间天气是全球性问题,需要全球化的解决方案,需要全球合力参与。子午工程一期对能量如何从高纬(地球磁层外部)扩散到低纬(磁层内部)的研究,跨出了全球性空间天气研究的第一步。子午工程二期可以实现空间天气观测从太阳到地球的全过程,完成了全球性空间天气研究的第二步。这一

系列工作为国际子午圈计划提供了宝贵的研究成果和技术支持,为全球空间天气研究和国际合作作出了重要贡献。

国际子午圈大科学计划是全球性空间天气监测研究的第三步<sup>[17]</sup>。其全球地基分布网络可以把地球空间变为物理信息的三维网格,借助地球自转,每12个小时生成一张地球空间环境的“核磁共振图像”。科学卫星穿行其间,在关键格点对关键过程进行详细诊断。同时,数千台不同种类的仪器设备相互定标,将全网络的测量绝对基准维持在一个稳定精准的基线上,不断完善地球环境监测能力指标。例如,地球磁场现在以每百年10%的速率衰减,导致太阳能量粒子和宇宙射线对地球大气的作用大幅增强。这一变化是否影响气候及其他环境因素,需要国际子午圈计划这样长期、稳定和综合的全球性观测来判别。

国际子午圈计划自从提出以来得到了国际热烈响应,数百位国际科学家参与规划。来自中国、巴西、俄罗斯、泰国、法国、美国等国的30多个研究机构,以及国际组织积极支持和参与。作为先行先试,从2014年开始,中国科学院与巴西国家空间研究院(INPE)共建中巴空间天气联合实验室。经过两期建设,在10个台站部署了包括激光雷达、GNSS电离层TEC与闪烁监测仪、大气电场仪、全天空气



图9 国际子午圈计划示意图





图10 中巴实验室站点分布图  
(图中红色台站为运行台站,绿色台站为计划台站)

辉成像仪、磁通门磁力仪等在内的16台监测设备,并且完成了南美数据中心的建设。此外,东南亚、北极高纬监测网也在稳步推进中。这一系列工作将为全球空间天气研究和国际合作提供重要支持,提供了开展大规模国际合作的经验。

国际子午圈计划得到了北京市以及科技部、中国科学院、国家自然科学基金委等国家部委的培育项目支持。2023年9月国际子午圈总部大楼在北

京怀柔科学城正式启用。与此同时,国际子午圈第一届科学委员会会议、2023国际研讨会和空间天气培训班成功举办,这些活动为国际子午圈计划的发展和合作奠定了坚实的基础。

## 6. 结语

地基监测是天地一体化空间环境监测体系中的重要组成部分和基础。相比国际上其他监测要素和手段较为单一的地基监测网络(如地磁监测网络MAGDAS、超级双重极光雷达网络SuperDARN、国际地球动力学服务机构IGS等),子午工程监测手段最综合、监测要素最齐全、覆盖日地空间圈层最完整、集同运行能力最强,实现了空间天气链锁变化过程端对端的整体监测,将对太阳活动-日地传输-对地影响的全过程研究产生重大影响。

子午工程一期的成功建设和运行,标志着我国空间环境地基监测的综合性能力取得重大发展,全球空间环境监测研究的重心开始向我国转移。子午工程二期的建成将完成这个重心的转移,我国将实现空间环境从认知能力向认知与保障能力的提升,逐步成为全球空间环境地基监测研究最重要的



图11 国际子午圈总部大楼掠影



图12 2023国际子午圈研讨会暨“一带一路”空间天气培训班9月14日在北京开幕  
全球10余个国家的100多位空间物理科学家齐聚怀柔科学城

数据来源、最活跃的人才高地、最丰硕的成果策源地。正在推进的国际子午圈计划,将使我国借势形成全球辐射能力,使得我国空间环境地基监测研究能力实现从“跟跑”“并跑”到“领跑”的超越。

**致谢:** 本研究受到国家重大科技基础设施子午工程项目支持。

### 参考文献

- [1] 张语珊,许廷发. 2016. 0.1nT 灵敏度质子磁力仪设计. 地球物理学进展, 31(5): 2346-2350, doi: 10.6038/pg20160564.
- [2] 李磊,陈涛,王诗涵,提烁,蔡春林,李文,罗静. 2024. 子午工程二期大气电场仪及其初步观测.地球与行星物理评论(中英文), 55(1): 138-143. doi:10.19975/j.dqyxx.2023-005.
- [3] 王赤,陈志青,张晓曦. 探索空间天气的奥秘——东半球空间环境地基综合监测子午链. 2018年,浙江教育出版社.
- [4] 韩雪,周晨. 2023. 大气探测激光雷达的分类和特征. 南京大学学报(自然科学), Vol. 59, No. 5.
- [5] 胡中为,赵海斌,姚进生. 2009. 日全食时的日冕光学观测. 科学通报, 54: 1841~1849.
- [6] 王远方舟,金振宇,王希群,等. 2023. 窄带可调谐滤波器在太阳磁场测量中的应用. 科学通报, 68: 1927-1940.
- [7] 杨润,徐寄遥,朱亚军,袁韦. 2019. 基于Fabry-Perot干涉仪气辉观测数据反演中性风速方法比较. 空间科学学报. 39(1): 76-83, <http://ir.nssc.ac.cn/handle/122/7001>.
- [8] Bodo W R, Ivan A G, Grigori M K, et al. 2008. Advancing digisonde technology: The DPS-4D, AIP Conference Proceedings 974, 127.
- [9] Gordon, William E.. 1958. "Incoherent Scattering of Radio Waves

by Free Electrons with Applications to Space Exploration by Radar." *Proceedings of the IRE* 46 (1958): 1824-1829.

- [10] 刘丽佳,彭勃. 2016. 我国行星际闪烁观测概述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 46: 069601.
- [11] 王赤,陈志青,胡连欢,等. 2021. 我国空间环境天/地基监测平台的发展态势和展望. 航天器环境工程, 38(3): 225-239.
- [12] 王赤,徐寄遥,刘立波,薛向辉,张清和,郝永强,陈罡,李晖,李国主,罗冰显,朱亚军,王江燕. 2023. 国家重大科技基础设施子午工程在空间环境领域的亮点研究进展. 中国科学: 地球科学, 53(7): 1433-1449, doi: 10.1360/N072022-0137.
- [13] Hao, Y. Q., Z. Xiao, and D. H. Zhang. 2012. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake, *J. Geophys. Res.*, 117, A02305, doi:10.1029/2011JA017036.
- [14] Zhao, B., and Y. Hao. 2015. Ionospheric and geomagnetic disturbances caused by the 2008 Wenchuan earthquake: A revisit, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 5758-5777, doi:10.1002/2015JA021035.
- [15] WANG Chi, Chen Zhiqing, XU Jiyao. 2020. Introduction to Chinese Meridian Project-Phase II. 空间科学学报, 40(5): 718-722. doi:10.11728/cjss2020.05.718.
- [16] LIU William, WANG Chi, SHEN Xuhui, WU Jian, BLANC Michel, YAN Yihua, FU Suiyan, YUE Xinan, LEI Jiuhou, GONG Wei, ZHANG Shaodong, ZHANG Qinghe, WANG Xin, YANG Jing, ZHANG Xiaoxin, GAO Jing, XU Jiyao, YANG Guotao, LI Hui, REN Liwen, YANG Fang. 2020. International Meridian Circle Program. 空间科学学报, 40(5): 723-725. doi:10.11728/cjss2020.05.723.
- [17] 刘维宁, Blanc M, 王赤, Donavan E, Foster J, Lester M, Opge-noorth H, 任丽文. 2021. 国际子午圈计划的科学挑战和观测系统. 中国科学: 地球科学, 51(12): 2056-2062, doi: 10.1360/N072021-0037