

子午线上观天地

沿着东经120°线和北纬30°线，分布着我国空间科学领域的第一个重大科技基础设施——被称为子午工程的网络式空间环境监测系统。这个项目是用来研究什么的？为什么要如此布局？为了一探究竟，本刊记者采访了国家空间科学中心的吴季主任。

记者/闫凯

何谓子午工程？

科学世界：请您介绍一下，“子午工程”是个什么样的工程？

吴季：“子午工程”是“十一五”国家重大科技基础设施项目，全称是“东半球空间环境地基综合监测子午链”。它由两条“台站链”组成。一条在南北方向上，沿东经120°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。另一条在东西方向上，沿北纬30°线附近，东起上海，经武汉、成都、西至拉萨。两条线上共有15个综合性监测台站。这是一个以链为主、链网联合运作的大型空间环境地基监测系统。

科学世界：它是用来研究什么的？

吴季：我们通过用地磁（电）、无线电、光学和探空火箭等多种地面监测手段，随着地球的自转，连续监测地球周围的空间环境。空间环境和我们平时常说的海洋环境、陆地环境、大气环境不同，可以说是人类生存的“第四环境”，与人类的活动和发展息息相关。

科学世界：原来是这样。那是谁提出的最初设想呢？

吴季：1993年，在我国一个空间物理学的规划会议上，中科院院士、空间物理学家魏奉思、王水等专家提出，要“做一个大科学装置，把现有的监测设备都连起来使用”。我国疆域辽阔，南北向、东西向距离均超过5000公里，不可能到处铺设监测设备。所以，大科学装置布置的重点，就收缩到我国科研机构相对比较集中

的东经120°线的周边。“子午线”的名称比较响亮，所以这个项目就被简称为“子午工程”。2008年1月5日，子午工程正式开工建设，2012年10月23日通过了国家验收。

科学世界：沿着这条子午线布设的监测站，随着地球自转，不就可以扫描整个空间环境了吗？为什么还要在东西方向又设置一条监测链呢？

吴季：在项目论证的过程中，科学家们提出一些新问题，比如“地磁场发生变化时，电离层会发生扰动，那么

从低纬度到高纬度的空间环境是不是同时变化的？也就是说，二者之间是不是还有个能量的传输过程？如果有，这个传输是从两极传到赤道，还是从赤道传输到南北极？”之类。

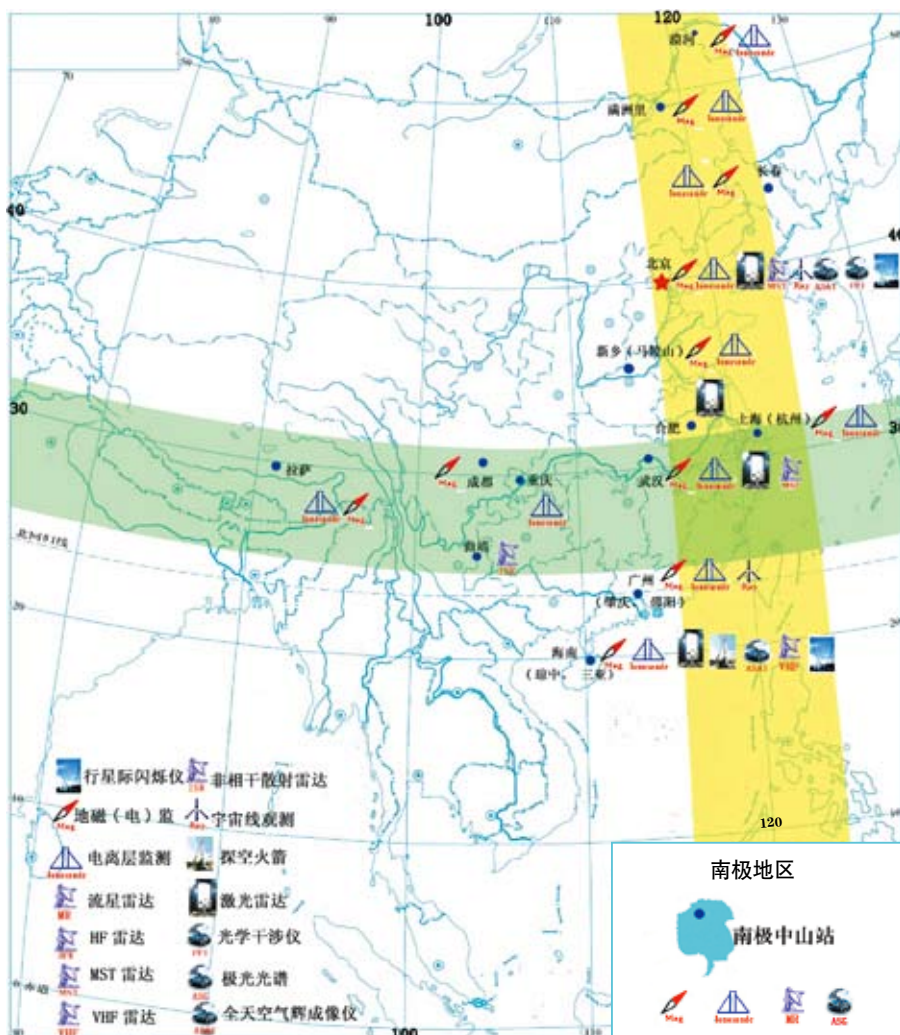
南北方向上的空间环境变化，我们称为“纬度效应”。在子午线上设置监测站，就是要看有没有纬度效应。同时，还要研究不同地理位置上（南北方向）的电离层、高层大气的分布和能量传播情况。

东西方向的这条监测链也很有意义。我国地域广阔，所以我们要充分利用这种



吴季，中国科学院国家空间科学中心主任，中国空间科学学会副理事长，国际空间研究委员会（COSPAR）副主席，长期从事空间微波遥感技术研究和空间探测技术研究，在空间科学和探测领域发表论文100余篇，参与领导的“地球空间双星探测计划”于2010年获国家科技进步奖一等奖。摄影/马璐瑶

子午工程地图



子午工程由两条“台站链”组成，最南端的站点延伸到南极中山站。它可以监测地球表面20~30公里以上到几百公里的中高层大气、电离层和磁层，以及十几个地球半径以外的行星际空间环境中的地磁场、电场、中高层大气的风场、密度、温度和成分等相关参数。

地理上的跨度，对比经度不同带来的效应。实际上，电离层是高空大气向上扩散被电离以后形成的，而下层大气的运动大多是东西向运动的，所以，电离层和下层大气有很大的关系。因为地球有自转，很多电离层的不均匀结构也是沿着东西方向分布和移动的。这些差异可以从东西方向的这条链检测出来。

另外，由于地球在自转，电离层随着太阳照射情况的不同，具有“日效应”，即正午、子夜、早晨、黄昏，各个时段都有特殊的效应。在东西方向上设立监测站，我们就能随着地球自转，连续地监测

到一天中的不同地理时间的空间环境的变化。这样，在东经120°线和北纬30°线两条链上联合监测，可以同时测得纬度效应和地理时间的效应。

科学世界：子午工程只测量我国境内上空所对应的一小段空间环境，那么东经120°线上的其他部分的空间环境又该如何探测呢？

吴季：我国在南极的中山站也在为子午工程提供数据。

在子午工程建设初期，我们就在倡导“国际子午圈计划”，希望把我国的地面站延伸到位于东经120°线上的其他国

家。我们和北面的俄罗斯建立了中俄空间天气研究联合实验室，将探测范围向北延伸；又和南面的澳大利亚签定协议共享这条子午线上的监测数据，将探测范围向南延伸。现在，无论在北半球还是南半球，只要在东经120°线附近，都有监测台站。

把地球转过半圈，“国际子午圈计划”还会涉及西半球的西经60°线。目前主要是美国和加拿大拥有探测技术和设备，他们比我们起步早，但是没有组成链。此外，我们打算帮助南美洲国家在这条子午线上建设一些监测台站。这样一来，两条子午线接成了一个圆，在这个大圆上分布的地面监测设施就可以进行联合监测了。

科学世界：子午工程的各种仪器是怎样探测空间环境的？

吴季：我们用地磁仪监测地磁场。此外，还有无线电雷达、激光雷达、探空火箭等手段综合探测。

例如，用雷达向天上发射一个无线电信号，在中性大气里不会产生回波，直到遇上电离层，才会产生回波。这是因为当电子密度大到一定程度，无线电波就无法通过了，会被反射回来。

到夜间，我们用激光可以打到电离层中的E层（约90公里高）。在这个高度的大气中有金属钠的聚集，对激光有强的反射。通过计算激光返回的时间，可以判断出该层的高度。根据回波的强度，判断这一层的大气密度的变化。

科学世界：2012年通过国家验收后，子午工程有了什么新的研究成果？

吴季：我们找到一些事例，可以证明纬度效应、磁层和电离层耦合。这些科学数据也被应用于我国重大的空间活动，比如载人航天工程等。在嫦娥卫星发射期间，子午工程也提供了空间环境的背景数据。

空间环境与人类息息相关

科学世界：地球的空间环境包括什么？

吴季：地球空间环境包括中高层大

气、电离层、磁层、行星际空间。大气层离地面越高，物质就越稀薄。但是，绝对真空是不存在的。到很高的高度时，很稀薄的大气被太阳发出的紫外线照射，就会发生电离，即变成了电子（带负电）和离子（带正电）。由于地球本身就是一个偶极场的大磁体，周围分布着磁场，所以地球磁场就会推动这些带电粒子运动。

科学世界：太阳活动是如何影响地球的？

吴季：日地空间是一个耦合的复杂系统。太阳活动与太阳爆发引起的太阳风扰动，通过与地球磁层相互作用，形成地磁暴（地球磁场发生剧烈波动）、亚暴等磁层扰动，并通过一系列耦合系统，进一步影响到地球电离层和热层，引起电离层暴、热层暴，产生包括极光在内的中高层大气剧烈扰动现象。

太阳除了向地球发出各种电磁波，还输出物质。太阳活动中的“CME事件”

（日冕物质抛射事件），是太阳系里最为猛烈的物质抛射和能量转换过程，也是最为剧烈的爆发过程。通常情况下，“太阳风”是一种很稀薄的比较稳定的等离子体。但是在发生日冕物质抛射事件时，太阳风就会携带一大团高密度的带电粒子，而且携带着特定方向的磁场。当这些物质到达地球附近的时候，它们就会对地球周围的空间环境状况造成强烈扰动。

科学世界：日冕抛射的物质是怎样影响到地球磁场的呢？

吴季：太阳抛出的等离子体携带的磁场比地球磁场弱，等离子体本身是带电的粒子。当它们运动到地球的偶极磁场以后，运动的带电粒子就会在磁力的作用下，向地球两极运动。地球磁场有个“刚度”，在一般情况下可以维持自有的形状。当地球磁场正常的时候，带电粒子会在距离地球6万公里远的地方（磁层顶）聚集，在地球磁场的作用下发生偏转后，粒子就向两极地区沉降。没有沉降的粒子继续向地球背面运动，拖出一条很长的磁尾。

太阳风来自太阳表面的某一个区域，所以喷出来的太阳风是带有一定方向的磁场的。即使它们在向外输送的过程中也会

非相干散射雷达（云南曲靖）



这部雷达是目前我国惟一的、全亚洲功能最强大的非相干散射雷达。它利用高空大气中的等离子体热起伏的微弱散射信号，来遥测高空大气的物理参数。

高频相干散射雷达（南极中山站）



这部雷达主要用于探测极区电离层对流和等离子体不均匀体的形成、演化过程。



MST雷达（湖北武汉）

MST雷达是一种工作在VHF频段（甚高频，频率为30兆~300兆赫兹）的大气层观测专用无线电雷达，用来观测中间层（Mesosphere）—平流层（Stratosphere）—对流层（Troposphere）的风场矢量和湍流。



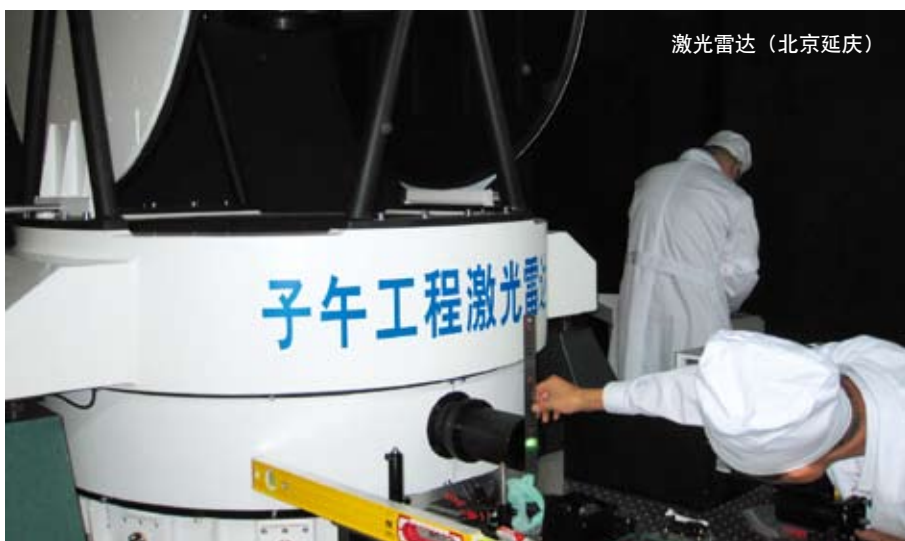
VHF雷达（海南儋州）

甚高频相干散射雷达，用来探测电离层的不均匀结构特性及变化。



行星际闪烁监测仪（北京密云）

该设备利用行星际闪烁现象，监测太阳风速度等参量。



激光雷达（北京延庆）

双波长三通道激光雷达，可同时获得近地面至110公里的大气后散射的回波信号，通过反演得到地球空间环境的中高层大气的密度、温度、钠层密度等大气参数。

保留这个方向的磁场。当太阳风运动到地球磁层顶的时候，两个不同方向的磁场就会发生“冲击”。

当太阳风很强的时候，太阳风粒子速度很快，等离子体携带的磁场强度很强，甚至会把向阳一侧的磁层顶压迫到距离地球3万公里远的地方，这相当于正常距离的1/2。大家都知道，运动的带电粒子在磁场中会受到洛伦兹力。粒子携带的能量和地球磁场发生作用以后，就会使地球的磁场发生扰动。地球磁场给运动的带电粒子某一个方向上的洛伦兹力，相应地，带电粒子也会给地球一个相反的作用力，最终使二者合成的磁场发生改变。

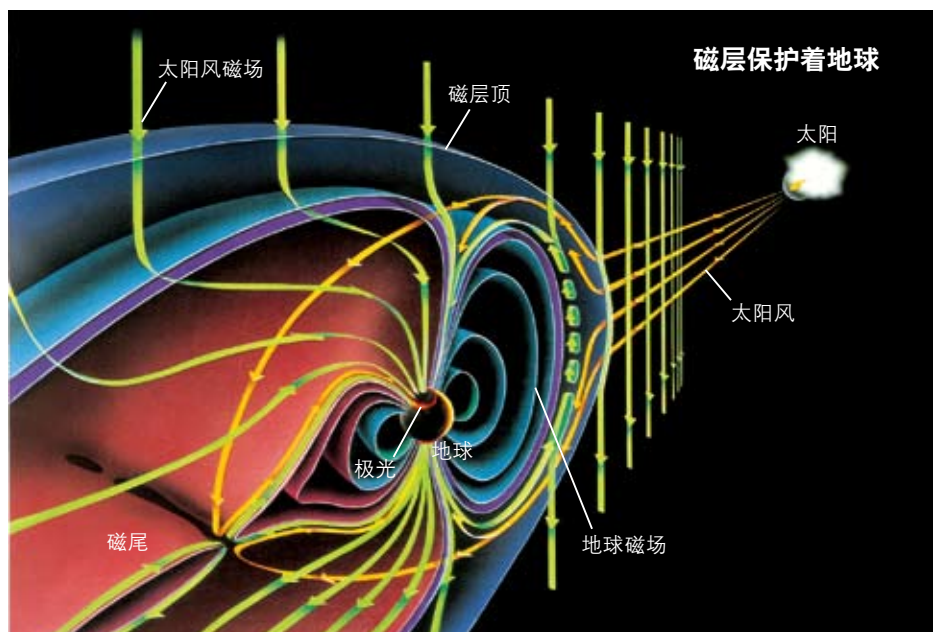
科学世界：地球的空间环境变化会对我们造成什么后果？

吴季：主要由于太阳活动，地球周围的空间环境总是在变化。地球磁场一变化，就会带动地球周围粒子的运动发生变化。这样一来，有的在地球周围运动的粒子就会被加速，这些能量很高的粒子打在人造卫星上，就可能导致卫星失效。目前所知，有40%的人造卫星故障都是由空间环境因素引起的。



探空火箭（海南儋州）

探空火箭可以探测中高层大气微量成分、电场以及电离层电子浓度、电子温度等，研究高层大气和电离层中的动力学过程及其对地磁活动和太阳活动的响应，为航空航天事业服务。



除此以外，电离层的波动也是由太阳活动引起的，一些技术设施也会受到影响。无线电要通过电离层的反射，进行远距离传播。现在的卫星与地面之间的通讯信号也要穿过电离层。如果此时电离层发生扰动，就会让遥测信号在某处电离层发生折射，导致遥测卫星或者接收信号的时候丢失数据。

在极地，地磁场的磁力线方向是从天空到地面的。如果地面上有个平铺的大环路的话（如输电线和输油管道），当磁力线发生扰动的时候，电线和管道围成的环路上就会有磁通量的变化，这样的话就会在“线圈”上产生感应电流。这种感应电流有时会非常大，会烧毁变压器和输油设备。

科学世界：太阳风带来的粒子是如何影响人造卫星的？

吴季：人造卫星是在有粒子的环境中运行的。如果粒子环境很安静的话，粒子的能量比较低，卫星的太阳帆板上会积累电荷（充电效应）。卫星在通过地球日照面和阴影面的时候，平衡被打乱，这些电荷会突然发生释放（放电）。放电时，会形成放电电流和辐射电磁脉冲，有的器件就会受到干扰。电磁脉冲被卫星上的数据线接收到以后，记录数据的“0”会变成“1”，“1”会变成“0”，这样就会发生数据错误。如果严重的话，放电的电流打在电气元件上，这些元件会受到损伤。

如果卫星在高能粒子的环境下运行，

这些粒子就会直接穿透卫星元器件的表面，打到芯片上。现在最容易被打坏的就是高集成度的半导体芯片，特别是存储器，也会发生“0”和“1”互换的错误。粒子打在芯片上，实际上是粒子的能量传递给半导体的P/N结上了。如果P/N结总是锁在“1”的状态，就变不成“0”了。惟一的办法就是让卫星关机，然后再开机。有的时候，卫星就完全损坏了，开关机操作也改变不了了。这种事故是经常发生的。所以我们生产卫星的时候要用“宇航级”的元器件，即使在遭受粒子轰击的时候，也能保持一定的抗“锁定”的能力。有的器件要做“三模冗余”设计，就是把3个相同功能的器件并联，若其中1个坏了，还有另外两个可以用，在判断正误上用三选二。因为这种空间环境事件是不可避免的，只能用各种办法来克服它可能带来的影响。

科学世界：发生地磁暴的时候，地磁场的强度有什么变化？

吴季：正常地磁场强度大约是50000nT。n是 10^{-9} ，T是磁通量密度单位“特斯拉”。地磁暴分为正暴和负暴，即增加和减少一部分地磁场强度。发生地磁暴的时候，地球磁场的变化会高达10%~20%。

科学世界：在我们的日常生活中，什么现象与空间天气有关呢？

吴季：在人类进入太空以前，确实没人特别关注过这个领域。从1957年发射第一颗人造卫星以后，人类就开始关注空间环境了。通常，只有载人飞船、火箭、人造卫星等技术设施可以进入“空间”区域。

如果空间天气发生变化的话，最直观的自然现象就是极光。

科学世界：只有极地附近才能看到极光吗？

吴季：在极端的空间天气现象中，即便是低纬度地区也能看到极光。我们在《后汉书》里查到记载，在公元775年1月，在长安地区（今陕西西安市部分地区，约北纬34°）就看到了极光。

科学世界：最近有没有发生过大规模的空间天气事件呢？

吴季：1989年3月13日，加拿大魁北克地区的电网大停电事故，就是由于空间天气事件引起的，引起人们的广泛关注。但是这次事件还不算最大的。

在1859年发生的“卡林顿事件”，应该是最近150年来发生的最大规模的空间天气事件了。当时在纬度很低的墨西哥（约北纬19°）都能看到极光。在没有月亮的夜晚，人们可以在极光下看报纸。那时候，世界上已经有地磁仪了，测出北半球地磁场变化比较大，但是高纬度地区的地磁仪读数甚至都饱和了——仪器指针已经打到最大读数，所以人们无法知道当地的真实数据到底

有多大。不过在低纬度地区（例如印度）有一些地磁仪保留下了当时的数据，测到地磁相对于正常值突然减小了20%。有报道称，在这次事件中，欧洲有一些有线电报网上产生了巨大的感应电流，把终端设备上的电报纸都烧着了。这些都是当时记录下来的空间天气事件对人类社会造成的一些影响。

假如我们现在的社会再经历一次那种级别的地磁暴事件，很多卫星应该都会被毁掉的，而且地面上很多基础设施，比如变压器、石油管道都会被损坏。所幸的是我们现在还没有遇到那样大的磁暴事件。向前回溯150年，就已经发生过一次这样的严重事件，如果继续倒退至1000多年前的唐朝，这中间还可能发生过好几次重大的空间天气事件。只是以前还没有电气和空间的基础设施，不会对人们的正常生活造成那么大的影响，因此也没有留下记录。

科学世界：当空间天气发生剧烈波动时，会对生活造成什么影响？

吴季：信鸽是用地磁场导航的，如果发生磁暴的话，信鸽就可能找不到回家的路。所以，信鸽协会要经常关注空间天气的信息。

海事卫星电话、GPS导航系统，都会因为电离层活动而被干扰。如果用单频的GPS设备进行定位，正常情况下精度为10~20米，被干扰之后偏差可能会有几百米。

航空公司也很关心空间天气情况。美国航空公司规定，如果发生重大空间天气事件，飞越极区的航班的飞行员可以拒绝飞行。因为太阳风粒子会在北极上空沉降，辐射量非常大，如果在这期间通过的话，相当于拍了多次X光片。

人类社会越是依赖空间基础设施，可能受到空间天气的影响就越大。在国外，已经形成了由电力系统、航空系统、通信系统、保险公司、户外活动人员、卫星用户和卫星研制单位组成的庞大的空间天气预报的用户群体。

空间天气预报为何重要？

科学世界：空间天气预报能在多大程度上减少这些危害呢？

吴季：如今，很多基础设施都会受到空间环境的影响。所以，人们希望可以像天气预报那样预报空间天气，并采取一些应对的

防护措施。比如，当预报有强烈的太阳活动时，可以先把卫星关机，暂时躲避磁暴，等这阵太阳风吹过去以后再开机。

科学世界：子午工程在预报空间天气时能起多大作用？

吴季：子午工程主要是提供地面的观测数据。只有对太阳的观测才能带来先兆性的预报参数。比如，日冕物质抛射到行星际空间以后，要走1天半到2天才能到达地球。但如果只是看到抛射现象，那还不能肯定地说“这团物质会到达地球周围的空间”。

科学世界：这是为什么呢？

吴季：通过地面上的望远镜，是可以看到太阳上有物质喷出来了，可是这团物质在行星际空间的运动方式比较复杂，最终可能会跑到别处去。

在太阳和地球之间有一个“拉格朗日点L1”，是太阳和地球的引力平衡点，距离地球约150万公里。如果在这里放一个卫星，就可以充当探测太阳风的前哨站。美国和欧洲空间局联合研制的SOHO卫星（Solar and Heliospheric Observatory，太阳和日球层探测器）就是这样的一颗卫星。如果太阳风一直很宁静，突然间，卫星监测到的粒子数升高了，说明这团物质已经到了L1点了。太阳风从L1点到地球的磁层顶大概还需要40分钟时间。在“前哨站”探测到的这些数据很重要，可以用作空间天气的警报。

当太阳风已经到了磁层顶，最终到达电离层，使之发生变化，可能还要经过1~2天。因为大量的粒子聚集、沉降到地球的两极。地球磁场受到外界压迫以后，突然膨胀或者收缩，反过来再影响电离层。这时，很多之前没有沉降的粒子会运动到磁尾，再通过磁场重联释放能量，有一部分又运动回地球两极。每发生一次空间天气事件，从开始形成到最后宁静下来，需要几天的时间。

子午工程的观测结果表明，太阳风对地球造成的影响，大部分都是从地球的极区向赤道传播的。如果高纬度已经发生了空间天气事件，那么可以预测低纬度也很快就要发生了，于是可以提出

一些警报。如果电离层发生了变化了，我们预计大气也会发生变化，因为二者是一种相互的耦合关系。

科学世界：我国现在根据监测到的空间天气数据能做到预报吗？

吴季：要想准确地预报空间天气的话，首先要有好的物理模型，建好模型后输入参数，然后就可以演示以后几天的空间天气变化了。空间天气的物理模型的内容很多，包括太阳发生爆发以后，太阳风是怎样传输到地球的？太阳风传输到地球以后，怎么和地球磁场发生耦合的？这些耦合又带来了电离层的哪些变化？电离层和下部大气的耦合关系如何等等，是个很复杂的模型。只有得到足够的观测数据，才有可能建立起一个尽可能准确的物理模型。然后输入一些参数，就可以做准确的预报了。目前，我们的观测数据还不够，对事件发生和发展的机制还在研究、物理模型也还在建立中，整体上处于实验阶段。所以，现在的预报主要还是凭经验。

科学世界：我们能不能直接用国外的数据做空间天气预报？

吴季：在第二次海湾战争（2003年）之前，我们已经开始做空间天气预报了。那时我们还没有自己的太阳观测卫星，大量的数据来自国外卫星。但是，战争爆发后，我们就收不到他们的卫星数据了。因为美国在这个特殊时期可能要利用这些空间环境的数据，或者怕其他国家利用这些数据干扰他们的军事行动，于是就把卫星数据封锁了，直到战争过后才恢复开放。

一般来说，做科学研究的卫星，获得的数据都是向全世界开放的。但上面的例子说明，在某些特殊时期，即使是科学卫星，也可能不开放。所以我们还是需要建立自主的、地面的，乃至空间的空间环境监测系统。

科学世界：那么，您能给我们介绍一下子午工程未来的发展计划吗？

吴季：以后，我们还打算对子午工程在我国境内的两条线进行加密，也就是在东经100°和北纬40°各加一条线，与现有的两条线一起，组成“井”字形的监测网络。这个网络建成后，就可以为我国的空间天气研究提供更详尽的科学数据。N