

太阳风暴及其对人类社会活动的影响

曹晋滨

(北京航空航天大学 宇航学院空间科学研究所, 北京 100191)

摘要: 第 24 个太阳活动周峰年即将到来。太阳风暴由于其给现代人类社会活动带来的巨大灾难, 引起了越来越多的关注。文章首先回顾了太阳风暴及其对人类社会活动的影响, 然后对历史上 1859 年卡林顿事件中太阳风暴和近几十年来著名的太阳风暴的强度进行了比较, 最后简要介绍了太阳风暴所涉及的科学和技术问题, 并且提出了减轻太阳风暴给社会活动带来灾害的对策。

关键词: 太阳风暴; 磁暴; 空间天气; 卡林顿事件

中图分类号: P353

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)03-0237-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.03.001

0 引言

在宇宙间所有的天体中, 与人类关系最密切的就是太阳, 它的光和热维持着地球上人类生存以及其他一切生命活动所必需的环境。但是太阳带给人类的并不仅仅是光明和温暖, 有时太阳上的剧烈活动也会导致地球空间环境产生剧烈扰动, 从而给人类社会活动带来巨大的灾难。

近年来媒体上经常提及超级太阳风暴, 其背景主要是基于古代玛雅人的预言。古代玛雅人预言 2012 年 12 月 21 日即第 5 个太阳纪结束时, 太阳会消失, 大地剧烈摇晃, 灾难四起, 地球会彻底毁灭。所谓第 5 个太阳纪结束可能指的就是 2012—2013 年即将到来的第 24 个太阳活动周峰年。针对新的太阳活动峰年事件, 美国国家科学院 2009 年 1 月发表了题为《灾害性空间天气事件对社会和经济的影响》

(Severe space weather events: understanding societal and economic impacts)^[1]的科学报告, 预估超级太阳风暴将会给地球带来巨大灾难, 给美国造成的经济损失可能高达 2 万亿美元(灾难发生第一年的经济损失), 灾难后恢复重建时间可能需要 4~10 年。这个报告在国际上引起了较大的反响。欧洲航天局空间天气研究小组主席迈克·哈普古德(Michal Hapgood)说: “我并不认为这份特殊报告是散布谣言。科学家的本性是保守的, 他们的分析是经

过认真思考的。这是一份公正的没有夸大的报告。”

针对即将到来的太阳活动峰年事件, 全世界给予高度关注, 我国也在致力于应对措施的研究。

1 太阳风暴及其影响

所谓太阳风暴就是指太阳表面发生的剧烈爆发活动及其在日-地空间引发的一系列强烈扰动^[2]。太阳爆发活动主要是指太阳耀斑和日冕物质抛射。在一次太阳风暴中, 耀斑和日冕抛射不一定全部出现, 但一次强太阳风暴必定包含这两种现象。太阳爆发活动喷射的物质和能量到达地球空间后, 会引起地球磁层、电离层、中高层大气等地球空间环境强烈扰动, 从而影响人类社会活动。

触发太阳风暴的太阳活动主要通过增强的电磁辐射、高能带电粒子流和等离子体云 3 种形式影响地球空间环境, 而这 3 种形式到达地球的时间是不一样的。太阳耀斑电磁辐射须经 8 min 到达地球, 太阳高能粒子辐射需要 30~60 min 到达地球, 日冕物质抛射的等离子体云则在 1~4 d 后到达地球。它们的作用会触发地球空间环境中多种灾害性扰动事件。

1.1 太阳耀斑和日冕物质抛射产生 8 min 后

由于太阳耀斑的电磁辐射最先到达地球, 所以电离层首先会出现突然扰动。耀斑的极紫外辐射和

收稿日期: 2012-02-15; 修回日期: 2012-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 40931054); 973 项目(编号: 2011CB811404)

作者简介: 曹晋滨(1964—), 男, 长江学者特聘教授, 1996 年在法国图卢兹第三大学获博士学位, 现为北京航空航天大学宇航学院空间科学研究所所长。E-mail: jbciao@buaa.edu.cn。

X 射线直接引起向阳面电离层 D 层电子密度的快速增加。虽然短波通信主要是靠 F 层反射,但由于 D 层的电子密度突然增大,无线电信号在穿过 D 层的过程中会受到强烈衰减,尤其是极区无线电通信,严重时将会完全中断。

1.2 太阳耀斑和日冕物质抛射产生约 0.5 h 后

太阳耀斑和日冕物质抛射产生 0.5 h 后,太阳高能质子以及部分行星际 CME 激波加速产生的高能粒子到达地球。由于地磁场的阻挡,只有刚度较大(在地磁场中回旋半径较大)的高能粒子能够横越磁力线,进入地球中低纬空间,引起地球空间高能质子通量的迅速增加。刚度较低(回旋半径较小)的高能粒子则不能横越低纬磁力线,只能沿着磁力线进入高纬极区。在地球极区,由于太阳高能粒子会沿着磁力线到达极盖区电离层底部,引起极盖区电离层 D 层的电离急剧增强,电子密度增大,从而导致通过该区的无线电波被强烈吸收,称之为极盖吸收事件。在强太阳风暴期间,极盖吸收事件会导致极区通信受到干扰甚至中断。极盖吸收事件对极区航线影响很大,而极区的航线又对可靠的全程通信要求很高。由于卫星通信不能覆盖地球高纬地区,飞机穿行这些地区时需要采用高频短波通信。这样一来,极区航班不得不改变飞行线路。2003 年万圣节太阳风暴期间,由于全球短波通信受到干扰,穿越极区的航班只好改变航线。而每次改变极区航线的飞行都要多花费 10 万美元^[2]。

太阳高能质子的影响不仅仅局限在通信上,还会造成飞行高度处辐射剂量的增加。据估计,在 1956 年的太阳质子事件期间,在 12 km 高度的大西洋航班的辐射剂量可能达 10 mSv。针对某些国家(例如日本),这个剂量已经超过国家法规规定航空公司机组人员受到的年辐射剂量的上限 5 mSv,会对空勤人员的身体健康带来严重危害^[3]。

1.3 太阳耀斑和日冕物质抛射产生约 1~4 d 后

日冕物质抛射在离开太阳日冕以后沿着合适的运动方向,将在 1~4 d 以后到达地球。具体的时间延迟取决于日冕物质抛射在日地空间的运动速度。日冕物质抛射的高速等离子体团携带着日冕磁场,到达地球后与地球磁层相互作用,在一定条

件下,通过压缩地球磁层以及发生在磁层顶的磁场重联等机制,将巨大能量输运到地球磁层中,并以磁场的形式储存在地球磁尾中;又通过发生在磁尾的磁场重联,将磁场能量转化为粒子的动能和热能,进而引发磁层大尺度的剧烈扰动——磁层亚暴和磁暴。磁层亚暴和磁暴将会严重威胁现代人类生活所密切依赖的空间和地面技术设施。大磁暴过程中地面磁场的剧烈变化可以产生感应电流,损害电力设施,破坏输油管道;磁暴期间大气密度增加,增大了航天器运行阻力,从而加快其轨道高度衰减和寿命的缩短。电离层暴将会影响全球范围的短波通信和卫星导航。磁尾热等离子体向近地空间的注入会引起卫星表面充电;高能电子暴还会引起卫星深层充电。这方面比较典型的事例有:

1) 1959 年 7 月 15 日,太阳风暴触发了大磁暴和电离层暴,环球通信突然中断,使一些靠指南针和无线电导航的飞机、船只一下子变成了“瞎子”和“聋子”。

2) 1989 年 3 月,太阳日冕物质抛射大磁暴引发了加拿大魁北克省大范围停电事件。在这次磁暴中,魁北克省整个电网在 90 s 内全面瘫痪,许多变压器被烧毁,600 多万人在无电的冬天度过了 9 h。这次事件造成的电力功率损失约 200×10^8 W,直接经济损失约 5 亿美元^[2]。

3) 1998 年 4—5 月,当日冕物质抛射/磁云扫过地球时,在地球磁层 $L \approx 2 \sim 7$ 范围内引起了持续一两个星期的新的相对论性电子辐射带。德国科学卫星 Equator-S 和美国商业卫星 Galaxy-4 分别在当年 5 月 1 日、5 月 19 日先后报废。

2 历史上的超级太阳风暴——卡林顿事件及其特征参数的预估

之所以科学家们认为发生超级太阳风暴是有可能的,是因为在 1859 年曾经出现过一次超级太阳风暴,称之为“卡林顿”事件。那次事件的太阳风暴要比 20 世纪 70 年代以来遇到的任何太阳风暴强得多。卡林顿事件中,大磁暴产生的强烈地磁效应使电报机出现火花,电线被熔化,导致刚刚建成的电报网络陷入瘫痪。由于当时缺乏像今天这样完备的观测设备,我们至今无法得到那次太阳风暴到

底有多大的直接证据,但可以从以下几个方面间接求证^[4]:

1) 日冕物质抛射等离子体云撞击地球空间的速度

在地球空间附近,太阳风速度的平均值大约是400~500 km/s。2000年7月14—16日发生的太阳风暴,又称之为“巴士底日”(Bastille day)事件,7月15日撞击地球的等离子体云的速度约为900 km/s。与太阳风速度平均值相比,这已经是一个非常大的数值。卡林顿事件中,地面大磁暴发生在太阳耀斑后17.5 h,我们根据这个时间来估算,撞击地球磁层的等离子体云的速度约为2400 km/s。考虑到太阳风的动压与速度平方成正比,这意味着撞击地球空间的日冕物质抛射等离子体云的动压要比2000年7月太阳风暴的大6.1倍(忽略两者之间等离子体密度的差别)。在2000年7月太阳风暴中,地球空间的边界(地球磁层顶,其向阳面在日地连线上的位置一般为与地心距离 $10R_E$, R_E 为地球半径)被压缩到只有 $5R_E$,意味着地球同步轨道卫星(地心距离 $6.6R_E$)已经失去地球磁场的保护,处于地球空间以外的太阳风中。而卡林顿事件中,地球空间的边界(磁层顶)可能会被压低到 $4R_E$ 以下,意味着大量同步轨道卫星、GPS导航卫星和其他高轨道卫星将暴露在太阳高能粒子的直接轰击之下。

2) 太阳质子事件的强度

高能粒子与大气作用会产生硝酸盐和氨,它们随雨水降至地面。这就是大气的一种固氮过程。如果这种固氮过程发生在极区,含有硝酸盐的降水会被冰冻,从而按原始状态保存下来,不受污染。利用极区冰核硝酸盐成分的测定,加上卫星或其他现代技术手段对电离层的探测,人们给出了1855—2001年期间通量超过 10^9 pr/cm²的太阳质子事件通量分布图(图1)。从图1中我们可以看出,卡林顿事件中太阳质子通量约是2000年7月巴士底日事件中太阳质子通量的3倍。此外我们还可以看到,从20世纪60年代以后,发生特大太阳质子事件的次数已经很少。而在19世纪末期,发生特大质子事件的次数非常频繁。

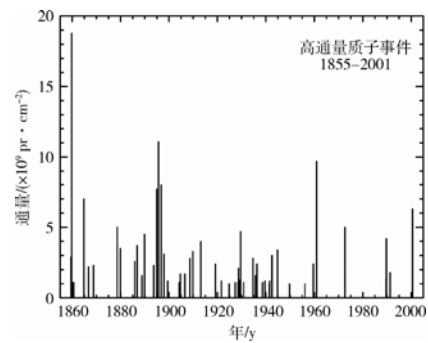


图1 1855—2000年期间,通量大于 10^9 pr/cm²的30 MeV以上太阳质子事件次数

Fig. 1 The occurrence times of all >30 MeV proton events with fluence exceeding 10^9 pr/cm² during 1855—2000

3) 磁暴强度

描述磁暴强度用的是Dst指数,其单位为nT。它是在全球范围内选择经度分布比较均匀、偏离赤道电急流的5个低纬台站,将各站每小时内所测得的磁场水平分量求平均,然后从中消除长期变化和静日变化量,最后再用公式归算到赤道上^[5]。一般认为,Dst<-200 nT的磁暴为大磁暴。Dst指数的计算从1957年开始,而1957年以前磁暴Dst指数只能通过历史上地磁测量数据进行估计。1957年以来至今最大的磁暴发生在1989年3月,其Dst指数达到-589 nT。而1859年卡林顿事件的磁暴Dst指数估计达到-1760 nT,约是1989年3月磁暴Dst指数的3倍^[4]。

4) 极光纬度

极光一般在高纬极区磁纬 60° 以上才能被观测到。但在大磁暴期间,可观测到极光的纬度向赤道方向延伸。在1859年卡林顿事件中,在南半球,观测到极光的纬度降低到磁纬 22° ,在智利都看见了极光;在北半球,观测到极光的最低纬度是磁纬 20° (美国夏威夷的火奴鲁鲁),这是历史上书面记载的极光观测磁纬第二低的磁暴。最低的极光观测纬度是发生在1872年2月4日的磁暴,其极光观测磁纬达到了 19° ^[4];而1989年大磁暴的极光观测纬度最低只达到 29° 。

从以上几个风暴特征参数的预估分析可以看出,1859年太阳风暴约是我们近几十年来遇到的最大太阳风暴即1989年3月的太阳风暴(从磁暴强度角度)和2000年7月的太阳风暴(从高能质子通量角度)的3倍。由于历史上曾经出现过超级太阳风暴,所以在未来出现类似甚至更大的太阳风

暴的可能性也是客观存在的。

3 太阳风暴的科学和技术问题

为了减轻和预防太阳风暴带来的危害,我们必须对太阳风暴有更加深入的了解,以便能够对太阳风暴及其造成的灾害进行较为准确的预报和评估。目前有关太阳风暴的关键科学和技术问题可以归纳为3个方面:

1) 太阳耀斑和日冕物质抛射是怎么产生的?后者在日地空间是如何传播和演化的?

太阳耀斑起源于太阳内部的磁场喷发。因此,要了解太阳耀斑,就必须清楚太阳发电机原理,即在活动期间太阳内部磁场是如何被加强的。要预报太阳耀斑及以后的发展,必须先了解太阳耀斑的先兆,即要了解大时间尺度下太阳极区磁场的发展及小时间尺度下单个活动区行为的发展。目前,还不能对太阳耀斑的发生进行完全可靠的预报。但由于耀斑是太阳磁场能量的释放过程,所以耀斑的预报方法实际上就是如何去获取日冕中磁场能量演化的信息以及确定导致耀斑发生的磁场位形^[6]。

日冕物质抛射对地球空间环境影响极大。大的非重现性磁暴经常与快速日冕物质抛射引起的太阳风扰动相联系。而很多近地空间观测到的大的太阳质子事件有可能是由日冕物质抛射引起的行星际激波加速太阳风中部分粒子所引起的。如果我们能更多地了解引起日冕物质抛射的太阳物理过程,并利用太阳、太阳风等离子体、磁场和高能粒子的实地观测数据来预报日冕物质抛射引起的行星际效应,则会极大地推动太阳风暴的预报工作。

2) 风暴期间地球空间环境是如何响应的?在极端情况下会恶化到什么程度?

地球空间环境的响应分为两个方面。一方面是对太阳耀斑光辐射的响应,这是一个直接响应过程,受影响的区域主要是电离层。另一方面是对日冕物质抛射的响应,这是一个间接响应过程,并且是地球空间扰动最大的过程。受影响的区域涉及到整个地球空间,包括磁层、电离层和大气层。其中最重要的扰动形式是磁暴、磁亚暴以及它们所产生的电离层暴和热层暴。以往的研究表明当太阳风或日冕物质抛射中的压缩磁场具有显著的南向分量

时,它与地球磁层会有更强烈的相互作用,地球空间就很可能发生大的磁暴和亚暴。但我们目前不仅无法准确预报它们爆发的时间和强度,甚至对这些地球空间暴产生的物理过程也不是完全清楚。例如关于磁层亚暴,目前有多达十几种亚暴触发模式^[7]。而亚暴究竟在何种磁层情况下会被触发,仍然是一个充满争议的问题。美国在2006年发射了THEMIS计划的5颗卫星,其主要科学目标就是研究磁层亚暴的触发机制^[8]。但是这5颗卫星运行了5年多,仍然没有搞清楚亚暴的触发机制。而如果对亚暴触发物理过程没有充分的了解,我们就不能准确地预报亚暴。

辐射带是地球磁场俘获的高能电子和离子存在的区域。辐射带分为内辐射带和外辐射带,由位于赤道上方 $1.5\sim 2R_E$ 处的一个极低粒子通量的槽区所分开^[9]。由于外辐射带中的高能电子对航天器安全运行有重要的影响,故被称为“杀手电子”。人类经过了近50年的观测,对外辐射带高能电子与地球磁暴的关系仍然不清楚。以往的观测显示磁暴期间辐射带高能电子通量存在3种变化形式:显著增加;显著减少;不变^[10]。其中,外辐射带高能电子通量显著增加发生的可能性最大。但是究竟在何种磁暴中高能电子通量会增加,增加多少,我们仍然不清楚。

3) 如何减轻和预防地球空间环境灾害性变化对人类社会的影响?

我们已经知道太阳风暴过程中产生的地球空间环境灾害性变化会对人类社会活动有重要影响,而且这种影响会随着人类社会活动对空间技术的依赖性增加而增大。因此如何以一个较低的合理成本来减轻和预防地球空间环境灾害性变化对人类社会的影响,是未来需要深入研究的问题。我们必须做好超级太阳风暴到来时的预案。例如,在超级太阳风暴期间,各种空间设施及相关活动应采取针对性措施,包括关闭卫星上的敏感仪器,避免在此期间对卫星采取大的机动措施等,或者干脆调整卫星发射计划。

4 我国目前存在的问题及对策建议

太阳风暴是空间天气研究的核心内容。我国空

间天气研究人员已经对太阳风暴进行了深入的研究,取得了许多重要成绩,但也存在需要改进的地方。例如太阳风暴预报实时获取太阳和地球空间观测数据的能力不足。目前在观测数据的获取方面,我国对国外的依赖还较为严重,特别是在天基观测上。虽然实施了双星探测计划后,我国的空间观测数据获取能力有了较大提高,但是卫星所提供的空间探测数据仍偏少。在空间探测计划方面,我国专门用于空间环境和空间天气监测与研究的卫星非常少,与国际发达空间大国相差甚远。除了“实践”系列卫星和“地球空间双星探测”卫星之外,我国还没有太阳活动(如日冕物质抛射事件)、行星际太阳风暴、地球空间暴(如磁暴、电离层暴和热层暴)等监测卫星,因此远不具备太阳风暴全过程的监测和预报能力,更谈不上空间天气探测系列卫星。

在空间环境探测技术设施方面,我国与国外相比差距还比较大,有相当多的无线电和光学仪器设备需要进口。在有些空间探测领域还是空白,例如低能电子能谱探测,极紫外和远紫外极光成像探测等等。

在空间天气预报方面,由于缺乏大量空间探测数据,我国空间天气模式基本上还是依赖于国外的模式,或在国外的模式的基础上改进而得。而国外投入业务运行的高精度预报模式一般不对外公开。这种状况远远不能满足我国日益增长的航天和军事活动的需求。所以建立我国自己的实用的空间天气模式是非常必要和紧迫的。

针对我国目前存在的问题,作者提出如下对策建议:

1) 着手空间环境探测体系的规划,制定空间环境探测计划,以期全面提升空间环境的监测和预报能力;

2) 开展空间天气预报模式的研究,增强我国空间天气预报服务能力;

3) 实施空间环境探测技术的预先研究,尤其是空白领域关键技术的攻关,不断缩小与国际航天强国的差距;

4) 加强国际合作与交流,取长补短,实现跨越式发展。

5 结束语

历史上曾经出现的超级太阳风暴及其对人类生活的破坏提示我们:未来出现同样强度的太阳风暴是完全有可能的,而且对人类社会活动的威胁更加巨大,因为今天的社会高度依赖于空间系统、电力系统、信息系统等现代技术设施。尽管人类对太阳和地球空间环境的了解远远不够,还无法预测超级太阳风暴的发生时间,然而我们必须未雨绸缪,对超级太阳风暴的出现做好必要的准备。同时也要知道,虽然太阳风暴可能给人类社会带来巨大危害,但人类完全没有必要恐慌。这是基于下面两个事实:

1) 太阳是稳定的

太阳耀斑和日冕物质抛射可以释放出巨大能量,但与太阳释放出的总能量相比仍然是微不足道的。例如一次大耀斑释放的总能量估计为 4×10^{25} J,若持续时间为 1h,则其发射功率约为 10^{22} J/s。与太阳总辐射功率相比,此量值可以忽略不计。因此,虽然存在太阳风暴,但太阳仍然是一颗稳定的恒星^[1]。

2) 地球是稳定的

太阳风暴中的特大磁暴会引起地球空间环境的剧烈变化,但即使在卡林顿事件中,引起地磁场变化幅度也仅为 1 760 nT,远远小于地磁场的基本磁场部分 ($3 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ nT)。地球基本磁场(内源场)也几乎不受地磁暴的影响。此外在太阳风暴中,与人类日常生活更为密切的低层大气所受影响较小。假如人类生活在两百年前,没有卫星、飞机、电力、无线电通信、GPS 导航、手机、电视等设施,则根本没必要关心太阳风暴,甚至夜晚坐在家还能看见极光,这真是一幅富有诗意的画面!

参考文献 (References)

- [1] National Research Council of National Academies. Severe space weather events: understanding societal and economic impacts workshop report[R/OL]. The National Academy Press, Washington D C, 2008. [2012-01-20]. <http://www.nap.edu/catalog/12507.html>
- [2] 龚建村. 太阳风暴揭秘[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 128-129
- [3] American Meteorological Society Policy Program & Solar Metrics. Integrating space weather observations &

forecasts into aviation operations[EB/OL]. [2012-01-20]. <http://www.ametsoc.org/atmospolicy/documents/space%20weather%20&%20aviation%20report.pdf>

[4] Cliver E W, Svalgaard L. The 1859 solar–terrestrial disturbance and the current limits of extreme space weather activity[J]. *Solar Physics*, 2004, 224: 407-422

[5] 徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 345

[6] Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research of USA. National space weather program[EB/OL]. Washington D C, 2000. [2012-01-20]. <http://www.ofcm.noaa.gov/nswp-ip/tableofcontents.htm>

[7] 曹晋滨, 李磊, 吴季, 等. 太空物理学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 328-336

[8] Angelopoulos V. The THEMIS mission[J]. *Space Science Review*, 2008, 141: 5-34

[9] 涂传怡. 日地空间物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 102

[10] Reeves G D, McAdams K L, Friedel R H W, et al. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms[J]. *Geophysics Research Letter*, 2003, 30(10): 1529-1532

[11] 林元章. 太阳物理学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 10

Solar storm and its influences on human activities on the earth

Cao Jinbin

(Space Science Institute, School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing100191, China)

Abstract: The 24th solar cycle year is approaching. The solar storm has attracted more and more attention due to the huge loss that solar storm brings about to the modern society. This paper briefly reviews the solar storm and its influence on human society and compares the solar storm in the Carrington event of 1859 and some recent famous solar storm events. The key scientific and technological issues associated with the solar storm are discussed and the measures to mitigate and avoid the loss brought about by the solar storm are suggested.

Key words: solar storm; geomagnetic storm; space weather; Carrington event

发射快讯

我国一箭双星成功发射两颗“北斗”导航卫星

4月30日凌晨4时50分,我国在西昌卫星发射中心用“长征三号乙”运载火箭将第十二、第十三颗“北斗”导航系统组网卫星顺利送入太空预定转移轨道。这是北斗卫星导航系统首次采用“一箭双星”方式发射导航卫星,也是中国首次采用“一箭双星”方式发射两颗地球中高轨道卫星。

北斗卫星导航系统自2011年12月27日正式宣布提供试运行服务以来,已转入系统建设和应用推广并举的新阶段,并逐步拓展到交通运输、气象、渔业、林业、电信、水利、测绘等应用领域,产生了显著的经济、社会效益。专家表示,此次第十二、第十三两颗组网卫星的成功发射,对改善和提高北斗卫星导航系统所覆盖区域的导航定位精度具有重要意义。

今年,我国还将陆续发射3颗北斗导航组网卫星,以进一步提升系统服务性能,扩大服务区域。按照原定的“三步走”发展战略,2020年左右,我国将建成由30余颗卫星组成的北斗卫星导航系统,提供覆盖全球的高精度、高可靠的定位、导航和授时服务。

本次发射的两颗北斗导航卫星及“长征三号乙”运载火箭分别由中国航天科技集团公司所属中国空间技术研究院和中国运载火箭技术研究院研制。这是中国“长征”系列运载火箭第160次航天飞行。

(摘自2012-04-30中国新闻网)