国际子午圈计划的科学挑战和观测系统

刘维宁¹, Michel BLANC^{1,2}, 王赤¹, Eric DONAVAN³, John FOSTER⁴,
Mark LESTER⁵, Hermann OPGENOORTH^{5,6}, 任丽文^{1*}

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

2. University of Toulouse, Toulouse 31400, France;

3. University of Calgary, Calgary T2N 1N4, Canada;

4. MIT Haystack Observatory, Cambridge MA01886, USA;

5. University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK;

6. University of Umeå, Umeå SE-901 87, Sweden

* 通讯作者, E-mail: lwren@spaceweather.ac.cn

收稿日期: 2021-02-09; 收修改稿日期: 2021-07-09; 接受日期: 2021-09-03; 网络版发表日期: 2021-10-18

中国科学院国际伙伴计划项目(编号: 183311KYSB20200003)和北京市科学技术委员会项目(编号: Z181100002918001)资助

摘要 随着科技发展, 人类活动对地面基础设施、空间系统和太空飞行器等高科技设施的依赖性日益增强. 然而, 这些高科技设施却常常遭受着来自太阳活动、地震、大气和气候变化、地磁场变化, 以及全球电场波动等多种危害的威胁. 监测和了解这些危害, 并减轻其影响, 是21世纪重要的科学挑战之一. 这些危害尽管形式不同, 但是有一个共同之处是会在电离层和中高层大气这个地球空间环境的关键圈层留下自己的印记. 国际子午圈计划是一项由中国科学院牵头的国际大科学计划, 其目标是整合、部署和运行一个全球研究和监测网络, 充分利用电离层和中高层大气的“显示屏”效果来追踪这些日地空间危害的踪迹. 文章展示了国际子午圈计划全球观测系统所需的位置分布, 即优先沿120°E~60°W大子午圈部署监测设备, 实现对主要地理和地磁纬度变化的最佳覆盖, 继而辅之以30°E~150°W的第二个子午圈来捕捉经度变化. 而后简单地描述了中国子午工程, 以及横跨中国、俄罗斯和美洲的一些国家在内的120°E~60°W大子午圈上的监测台站和设备.

关键词 国际子午圈计划, 电离层, 中高层大气, 中国子午工程, 空间天气

1 引言

通过电离层和中高层大气(ionosphere, upper and middle atmosphere, IMUA), 我们生活的地球环境与地球磁层、太阳风和行星际空间相互耦合在一起. 在IMUA内, 大气中性和等离子体成分与地磁场

通过复杂的电动力学作用强烈耦合, 使得IMUA一直受到来自其上方、下方以及内部的粒子、动量和能量输入的影响. 如图1所示, 上方, 太阳活动和行星际空间的扰动产生了“空间天气事件”, 影响着地球磁层和与其耦合的IMUA; 下方, 地震、太阳辐射度变化、天气系统和温室气体排放产生的扰动通过大气

中文引用格式: 刘维宁, Blanc M, 王赤, Donavan E, Foster J, Lester M, Opgenoorth 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

英文引用格式: Liu W, Blanc M, Wang C, Donavan E, Foster J, Lester M, Opgenoorth H, Ren L. 2021. Scientific challenges and instrumentation for the International Meridian Circle Program. Science China Earth Sciences, 64(12): 2090–2097, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9841-8>

图1 在IMUA这个“显示屏”上可以追踪到的日地系统内的多种扰动(空间天气、地球和太阳磁场长期变化、温室气体排放、全球大气电路瞬变、地震活动、大气天气和波动)

波动、电动力学耦合和电磁辐射等扰动传播到IMUA;最后,时间尺度为数年至数百年的地磁场长期变化,以及连接雷暴与电离层导电层的全球大气电路的瞬态变化,影响着与低层大气、电离层和磁层相耦合的全球电流系统,调节整个地球空间的能量传输过程。

了解IMUA如何受到这些扰动的影响,厘清不同扰动造成的不同影响,并解读它们对地球空间环境的威胁,是21世纪的重大科学和社会问题。充分利用IMUA受到几乎所有危害(自然和人为)影响的特征,我们可以将IMUA当作“显示屏”,通过这个“显示屏”来探测、认知、减轻,甚至有时可以预测那些威胁和危害地球生态系统和人类活动的扰动,如太阳活动、地震、大气和气候变化、地磁场变化、全球电路波动等。进一步地,我们还可以量化它们对地球空间环境,以及空间和地面基础设施安全的影响。

想要实现上述宏伟的目标需要调动和协调全球地

基监测网络,对IMUA进行不间断地联合探测。这正是中国科学院发起的国际大科学计划——国际子午圈计划(International Meridian Circle Program, IMCP)的总体目标,其科学表述如下:基于全球地基监测网络,对电离层和中高层大气进行持续探测,从而监测、认知,甚至减轻威胁地球空间环境的扰动。

2019年9月,国际子午圈计划办公室与国际空间科学研究所-北京(International Space Science Institute-Beijing, ISSI-BJ)在中国科学院国家空间科学中心联合举办了国际子午圈国际论坛,会上明确了国际子午圈计划所要解决的主要科学问题,商讨了观测系统的初步设计,制定了数据分析和建模原则,参见论坛报告(Liu等, 2020a)。本文以国际空间研究委员会(Committee for Space Research, COSPAR)中国国家报告国际子午圈计划文章(Liu等, 2020b)为基础,补充了IMCP科学案例、IMCP全球观测系统设计以及建模和数据同化方法三个方面的介绍。

2 国际子午圈计划的科学案例

地球环境主要受到三个驱动因素变化影响, 即连续太阳周期期间太阳活动的变化(Delaigue, 2019)、地球磁场偶极子强度快速下降和极点漂移(Mandea和Purucker, 2018), 以及温室气体排放的快速人为增长(Stock-er等, 2013). 了解这些变化及其相互作用需要一个全球尺度的观测网络来监测相关的日地空间的不同类型的扰动(图1中所示), 这些扰动和对应的时间尺度如下:

- A. 太阳活动和太阳风/磁层/电离层扰动(分钟到几十年, 甚至更长);
- B. 对流层/平流层天气系统扰动(小时到年);
- C. 气候系统的扰动和长期演化(月至数十年);
- D. 岩石圈活动和地震(数秒至数年);
- E. 地磁场的中长期变化(数十年到数百年, 甚至更长).

利用国际子午圈计划的全球监测网对上述扰动进行观测和研究, 解决以下三个问题: (1) 这些扰动的影

响如何传播到IMUA? (2) 这些扰动对我们的空间环境有何影响? (3) 如何利用这些扰动在 IMUA 上的印记来识别它们?

通过整合扰动A~E的源头和/或影响的空间覆盖的不同需求, 我们可以确定IMCP观测系统的“理想”位置布局. 如图2显示这些扰动来源和影响的墨卡托地图所示: 图2a为相等地理纬度和地磁纬度的等高线图, 与扰动A和E相关; 图2b为平均对流层环流图, 显示了纬向带和海陆对比, 与扰动B和C相关; 图2d为地震发生的全球分布(扰动D); 图2c为雷击影响的全球分布(扰动B). 每个图上的红色实线竖线和虚线竖线分别标识120°E~60°W和30°E~150°W. 对图2分析如下:

(1) 大多数扰动主要随地理纬度(扰动B和C)或地磁纬度(扰动A和E)变化. 对于扰动B和C(对流层天气和气候)而言, 除了主导的纬度依赖之外, 还伴随着陆地-海洋分布引发的显著的经度依赖.

(2) 国际子午圈计划监测网络最主要的特征就是实现对地理和地磁纬度的最优覆盖, 120°E~60°W子午

图2 沿两个正交大子午圈部署的IMCP观测系统的独特特性

主要子午圈(120°E~60°W)横跨东亚、西澳大利亚和美洲(红色竖线)和次要大圈(30°E~150°W)延伸至中欧、非洲、阿拉斯加、夏威夷、波利尼西亚和太平洋(虚线竖线). 这两个圈提供的地理和地磁覆盖范围接近于同时对本节中描述的五类灾害进行科学调查的最佳条件: A 日地耦合链和空间天气; B 低层大气天气、雷暴和全球大气电路; C 高层大气中的气候变化影响; D 地震活动; E 地磁场的长期演变. 这些灾害沿两个正交大子午圈, 120°E~60°W子午圈和30°E~150°W子午圈部署的IMCP监测网络, 将实现对上述五种扰动(A、B、C、D、E)灾害观测的最佳覆盖(Liu等, 2020a).

圈跨越东亚、澳大利亚和美洲, 并且距离地理和地磁的两极都很近, 是近乎最优的布局选择. 此外, 其广泛的陆地覆盖也有利于部署监测设备.

(3) $120^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{W}$ 子午圈覆盖了环太平洋火山带最东和最西边缘, 也是监测全球地震和火山灾害(扰动D)最活跃地带的好选择.

(4) 除了这个主子午圈之外, 对于捕捉由海陆对比和地磁场的地理经度不对称性引发的扰动源的显著经度变化, $30^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$ 的次子午圈(与 $120^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{W}$ 子午圈正交)将发挥重要作用. $30^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$ 子午圈穿过中欧和非洲, 跨越太平洋, 从阿拉斯加到法属波利尼西亚. 雷击分布图(扰动B, 图2c)显示, $30^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$ 次子午圈经过世界上闪电发生最多的区域——中非.

(5) 两个子午圈的观测数据相结合, 可以监测地震活动和雷暴活动的明显经度变化.

总之, 对所有扰动源的空间分布分析表明, $120^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{W}$ 大子午圈可捕捉到扰动灾害的主要纬度变化, 也是研究环太平洋火山带地震活动影响的理想布局.

$30^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$ 子午圈可以捕捉由陆地-海洋对比引发的经度变化, 尤其是对于对流层天气和雷暴活动而言.

3 国际子午圈计划观测系统

国际子午圈计划首先对全球范围内 $120^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{W}$ 子午圈上国家现有或计划中的观测设备进行整合. 而在这些低成本、标准化设备和观测阵列的基础之上, 补充大型的设施级设备(如激光雷达和电离层雷达). 中国监测地球空间全球扰动效应的地基综合监测网——中国子午工程(Chinese Meridian Project, CMP)(Wang, 2010)当前正在进行二期建设, 就是按照这样的原则设计和建造的(图3), 也将为IMCP全球观测监测网的设计和建设提供先期经验和借鉴.

国际子午圈计划监测网将探测IMUA的背景状态及其扰动. 对于主 $120^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{W}$ 子午圈, 一旦集成圈上部署的1000多台设备, 可以获得从地面到3000km高度的地球空间的综合横截面扫描, 包括电离层密度、温

图3 中国子午工程的设备阵列(a)和IMCP全球监测网络(b)

度、电场、磁场和风场及其波动, 以及与全球变化有关的微量成分的分布. 这些实时数据格式统一, 是前所未有的高时空分辨率的地球空间环境数据库, 可通过由北京的主数据中心和不同大陆的区域数据中心组成的分布式数据系统访问.

IMCP观测设备采取“珍珠链”式部署: (1) 少量大型设备(“钻石”), 诸如非相干散射雷达(ISR)(Resolute Bay、欧洲非相干散射雷达(European Incoherent Scatter, EISCAT)、中国三亚ISR等), 远程雷达等, 分布于不同大陆开展联合观测, 提供大尺度和密集覆盖的IMUA关键参数; (2) 大量中尺度设备(“珍珠”), 如阿萨巴斯卡大学磁强计网络增强版(Athabasca University THEMIS UCLA Magnetometer Network eXtension, AUTUMNX)、磁强计-电离层雷达-全天相机大型实验(Magnetometers-Ionospheric Radars-All-sky Cameras Large Experiment, MIRACLE)、过渡区探测-加强版(Transition Region Explorer-plus, TREX-plus), 在特定区域提供高保真度的区域特定参数; (3) 尺度全球观测系统对“钻石”和“珍珠”的观测覆盖范围进行补充, 如

超级双极光雷达监测网(Super Dual Auroral Radar Network: SuperDARN)、超级磁强计监测网(SuperMAG)、全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)以及其他某些天基观测; (4) 由各国资助建设中尺度设备阵列, 最好沿着IMCP子午圈进行, 可以完美地补充“钻石”和“珍珠”的覆盖范围。这样其他国家可以充分利用此机会, 以全面合作的方式加入这个国际计划。

鉴于对不同灾害扰动的最佳覆盖范围(图2), 根据目前的在几个大陆布局的难易程度以及准备成熟度, IMCP第一阶段实施计划是沿60°E~120°W大子午圈的几个大洲部署IMCP观测系统; 而后是第二阶段, 沿30°E~150°W次级子午圈部署观测系统.

图4给出了第一阶段沿60°E~120°W主子午圈部署的监测设备和网络示例: (1) 监测区域地震活动大气效应的设备, 可以形成地震带对其上空不同距离和高度处的影响, 及相关耦合机制的“立体”覆盖监测; (2) 区域综合网络, 由俄罗斯科学院(西伯利亚分院)运行的东-西伯利亚空间天气监测网; (3) 贯穿南北美洲的法

图 4 沿 $60^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$ 大子午圈的IMCP第一阶段观测系统部署的三个综合监测设备/网示例

(a) 一台研究地震的大气效应以及震区与IMUA之间的耦合机制的“局地”监测仪; (b) 监测空间天气区域效应的监测网——东-西伯利亚空间天气监测网, 由俄罗斯科学院运营; (c) 沿南北美洲部署系列法布里-珀罗干涉仪的DASI项目, 将通过测量热层风和温度的扰动, 来监测高层大气空间天气效应的纬度变化

布里-珀罗的干涉仪(FPI)纬度观测链——地球空间和空间天气研究分布式科学仪器阵列(Distributed Arrays of Scientific Instruments for Geospace and Space Weather Research, DASI)项目,能够监测空间天气事件产生的高层大气风场和温度扰动沿纬度的传播. 网络版附表1(<http://earthcn.scichina.com>)列出了中国以外沿120°E~60°W大子午圈的、已经建成并运行的一些台站和设备.

4 国际子午圈计划的建模与数据同化

IMCP将应用最先进的模型、人工智能工具和数据同化技术形成海量数据集,识别IMUA中不同类型扰动(A~E)的特征标志. 同时,还将采用和整合不同类型的模型,用来模拟与扰动源相关联的IMUA传播过程,从太阳风和行星际空间、磁层、电离层、高层大气层(“上方”的扰动),到岩石圈、大气层、电离层(“下方”的扰动),以及大气电路和地磁场长期变化的全球模型(“内部”的扰动).

要实现此目标,需要观测数据与先进数值模型之

间的深度融合. 例如,可以将数值天气预报(Numerical Weather Prediction, NWP)的先进数据同化技术应用到IMCP的数据处理中,中国研究人员已成功地在电离层短期预测中应用了该项技术. 图5展示了通过多源卡尔曼滤波器数据同化生成的总电子含量和电离层电子密度的全球分布(Yue等, 2012).

5 展望

本文中我们展示了IMCP观测系统沿120°E~60°W大子午圈的部署和运行(第一阶段)将如何为研究影响地球空间环境的不同类型扰动灾害提供观测上连续的时间覆盖和独特的纬度覆盖. 在第二阶段,将沿30°E~150°W次级子午圈进行建设,提高其经度覆盖范围,这也是本计划与欧洲和非洲国家开展紧密合作的好机会. 通过专门设计的天基设备补充地基观测系统,可以区分空间和时间变化,并且监测地基设备覆盖不完全的IMUA关键区,例如热层和中间层. 中国科学院和欧空局的“SMILE”卫星任务(solar wind magnetosphere ionosphere link explorer, SMILE)(Branduardi-Raymont

图5 通过数据同化生成的全球电离层电子密度((a), (b))、峰值电子密度(c)和总电子含量(d)的分布图例

等, 2018; Wang和Branduardi-Raymont, 2018)将首次实现该空间区域的探测。

六十多年前, 国际地球物理年计划分别研究了地球的不同圈层。解决21世纪最“炙手可热”的科学问题需要我们从全球尺度考虑, 了解其不同圈层之间的耦合过程。在这些圈层中, 电离层、中高层大气非常独特, 它如同一个显示屏, 可以监测威胁地球空间和人类活动的各种灾害扰动。特别地, 我们关注太阳到地壳构造板块和海洋的电磁耦合。电磁相互作用的快循环时间和长程特性可能是与全球变化相关的能量过程中的一个新元素。总之, IMCP地基监测设备的全球网络部署将提升我们对空间天气, 以及自然和人为灾害对于地球空间和人类活动影响的理解。

致谢 作者向中国科学院国家空间科学中心国际子午圈计划办公室, 特别是杨昉先生, 以及国际空间科学研究所-北京执行主任Maurizio FALANGA教授和工作人员恩丽娟女士和Laura BALDIS女士表示最深切的感谢。感谢他们对2019年9月23~25日在北京举办的IMCP-ISSIBJ论坛的组织给予的大力支持, 论坛提供了本文的主要材料。我们特别感谢本着友好国际合作和科学创新精神参加本次论坛的优秀团队成员: Aziza BOUNHIR(摩洛哥马拉喀什大学和欧凯梅登天文台)、Eric DONOVAN(加拿大卡尔加里大学)、John FOSTER(美国麻省理工学院)、傅绥燕(北京大学)、Alvaro GIMÉNEZ(西班牙国家研究议会)、Walter GONZALEZ(巴西国家空间研究院)、Natchimuthuk GOPALSWAMY(美国国家航空航天管理局戈达德空间飞行中心)、郭孝城(中国科学院国家空间科学中心)、Ludwig Klein(法国巴黎天文台LESIA)、雷久侯(中国科学技术大学)、Mark LESTER(英国莱斯特大学)、William LIU(中国科学院国家空间科学中心)、吕达仁(中国科学院大气物理研究所)、Mioara MANDEA(法国国家空间研究中心)、Hermann OPGENOORTH(瑞典乌麦大学)、Frédéric OUATTARA(诺伯特宗戈大学, 布基纳法索)、Koh-Ichiro OYAMA(日本九州大学)、Viviane PIERARD(比利时航空航天研究所)、郗秀书(中国科学院大气物理研究所)、Babatunde RABIU(尼日利亚国家空间研究与发展署大气研究中心)、任丽文(中国科学院国家空间科学中心)、申旭辉(中国国家自然灾害防治研究院)、Roman VASILYEV(俄罗斯日地物理研究所)、Wu Qian(美国国家大气研究中心高海拔天文台)、徐寄遥(中

国科学院国家空间科学中心)、颜毅华(中国科学院国家天文台)、杨昉(中国科学院国家空间科学中心)、乐新安(中国科学院地质与地球物理研究所)、张北辰(中国极地中心)、张清和(山东大学)、张顺荣(美国麻省理工学院)和Shasha ZOU(美国密歇根大学)。

参考文献

- Delaigue G. 2019. Variability of solar activity and climate impacts over the last centuries. *Encyclopedia of the Environment*. <https://www.encycopedie-environnement.org/en/climate/solar-activity-variability-and-climate-impacts-case-of-recent-centuries/>
- Branduardi-Raymont G, Wang C, Dai L, Donovan E, Li L, Sembay S. 2018. SMILE: Solar Wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer. Definition Study Report, ESA(SCI)2018-1, December, 2018
- Liu W, Blanc M, Bounhir A, Donovan E, Falanga M, Foster J, Fu S, Giménez A, Gonzalez W, Gopalswamy N, Guo X, Klein L, Lei J, Lester M, Lu D, Opgenoorth H, Ouattara F, Oyama K I, Pierrard V, Qie X, Rabiou B, Rao H, Ren L, Shen X, Vasilyev R, Wu Q, Xu J, Yan Y, Yang F, Yue X, Zhang B, Zhang Qi, Zhang S, Zou S. 2020a. Science Objectives and Observation System for the International Meridian Circle Taikong ISSI-Beijing. 19
- Liu W, Wang C, Shen X, Wu J, Blanc M, Yan Y, Fu S, Yue X, Lei J, Gong W, Zhang S, Zhang Q, Wang X, Yang J, Zhang X, Gao J, Xu J, Yang G, Li H, Ren L, Yang F. 2020b. International meridian circle program. *Chin J Space Sci*, 40: 723–725
- Mandea M, Purucker M. 2018. The varying core magnetic field from a space weather perspective. *Space Sci Rev*, 214: 11
- Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press
- Wang C. 2010. New chains of space weather monitoring stations in China. *Space Weather*, 8: 08001
- Wang C, Branduardi-Raymont G. 2018. Progress of Solar Wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer (SMILE) Mission. *Chin J Space Sci*, 38: 657–661
- Yue X, Schreiner W S, Kuo Y H, Hunt D C, Wang W, Solomon S C, Burns A G, Bilitza D, Liu J Y, Wan W, Wickert J. 2012. Global 3-D ionospheric electron density reanalysis based on multisource data assimilation. *J Geophys Res*, 117: A09325

(责任编辑: 徐寄遥)