特色专题

关于实施国际子午圈大科学计划的合作逻辑与路径

王赤,任丽文*,杨昉,范全林,张清和,刘维宁,李晖

摘要 空间天气具有全球性特征,对现代社会空间活动和相关基础设施构成系统性风险,开展全球协同观测与研究具有重要意义。国际子午圈大科学计划旨在响应全球监测与科学研究需求,构建跨地域、多学科联合观测网络。系统梳理了其科学与应用目标,介绍了创新研究、协同监测、数据共享和合作平台 4 个任务板块的布局,分析了任务实施的国际合作需求与路径。围绕多边组织、开放协作、权益对等、标准规范、数据与成果权益保障、互利共赢 6 项机制,提出相应治理思路。该模式有助于汇聚全球观测资源和科研力量,推动科学数据与知识转化为公共服务产品,为全球航天活动和空间经济发展提供支撑,并为国际大科学计划组织实施与全球科技治理贡献中国方案。

关键词 空间天气;国际子午圈大科学计划;国际科技合作;地基监测网络;国际组织;日地耦合

1 子午工程和国际子午圈大科学计划的提出

2025 年 3 月,中国重大科技基础设施——子午工程(Chinese Meridian Project, CMP)全面建成[1]。其沿 120°E、100°E 与 30°N、40°N 纬线布局,在 31 个观测台站部署近 300 台套设备,形成了“两横两纵”格局[2−5]。2025 年 6 月,中国科学家与国际合作伙伴向全球发布国际子午圈大科学计划(International Meridian Circle Program, IMCP)[6−9](图 1),推动地基监测由区域合作向全球协同拓展。

IMCP 基于子午工程,以 120°E~60°W 子午圈为主线,并联合东经 30°欧洲−非洲监测链,构成跨越多个国家与大陆的全球分布式地基观测网络,深入研究地球空间环境特征和变化规律,揭示其受太阳爆发和地球活动双重驱动的机制。目前,IMCP 已吸引全球 50 余家国际机构/组织参与,将为应对全球性的空间天气挑战贡献智慧和力量。

中国科学院国家空间科学中心,北京 100190

2 全球协同应对空间天气的必要性

2.1 空间天气是全球现象,是全人类面临的共同挑战

空间天气过程跨越国界,涉及太阳、行星际空间以及磁层、电离层和大气等多个区域与圈层,其影响具有全球性或广域性,是全人类面临的共同挑战[10−12]。区域尺度观测难以连续追踪扰动的传播演化,也难以区分局地变化与全球过程的联系。需要世界各国共同参与观测和研究,才能认识空间天气过程跨区域、跨圈层的物质输运与能量传递,为共同应对空间天气风险提供依据。

2.2 区域观测与分散协作的局限

现有地基观测积累了较成熟的区域探测能力,但观测范围、要素和运行规则各不相同[13−17]。子午工程主要覆盖中国区域,全球空间环境关键地区还存在观测空白;各国设备简单叠加,也无法有效解决连续观

收稿日期:2026−06−23;修回日期:2026−09−19

作者简介:王赤,研究员,中国科学院院士,研究方向为空间物理,电子信箱:cw@spaceweather.ac.cn;任丽文(通信作者),副研究员,研究方向为空间物理,电子信箱:lwren@spaceweather.ac.cn

引用格式:王赤,任丽文,杨昉,等. 关于实施国际子午圈大科学计划的合作逻辑与路径[J]. 科技导报,2026,44(18):39−44;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2026.06.00070

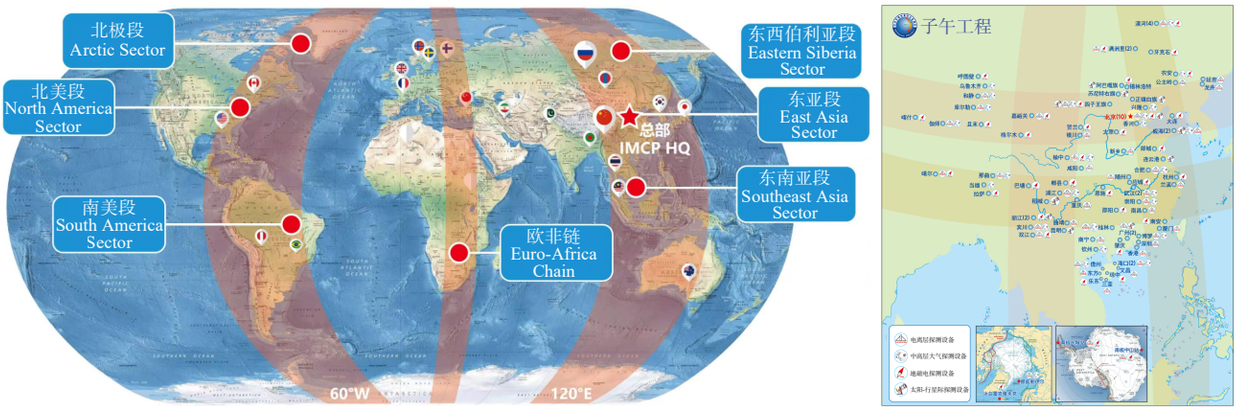


图 1 IMCP 与子午工程

测、数据兼容和联合研究中的协调问题。当前探测、模拟和数据处理技术的发展,为地基监测网络全球协同提供了条件,能否建立稳定的国际协作机制成为全球协同的关键[18]。为此,提出了 IMCP 系统性解决方案。

3 IMCP 目标和任务布局

3.1 IMCP 科学和应用目标

IMCP 旨在构建日地系统全球监测链,解码空间天气过程与规律。科学目标可概括为:认知一个系统——地球空间系统;厘清 2 个影响——来自太阳活动自上而下的影响,与来自地球系统自下而上的影响;揭秘 3 大难题——空间环境全球与典型区域的多要素多时空尺度特征和变化规律,太阳爆发在日地空间的传播和演化,空间天气与全球变化以及地球自然灾害的关系。

应用目标是服务全球空间科学共同体,公开发布空间天气物理与人工智能(artificial intelligence, AI)模型、开放 IMCP 科学数据;服务全球航天机构,公开发布空间天气预报产品,服务于世界航天活动;培养全球空间复合型人才,打造全球人才交流和聚集高地。

3.2 IMCP 任务布局

IMCP 拟成立“IMCP 国际组织”,构建由科学与应用双目标驱动,全球多国深度参与的国际多边大科学合作模式,整体协调和推进 IMCP 4 大板块任务。

1)创新研究板块。围绕太阳活动源头、太阳风与地球空间系统耦合、空间环境区域特征与全球变化、岩石圈与大气活动的空间环境效应,以及数智预报与 AI 应用开展联合研究。

2)协同监测板块。建设太阳爆发“日不落”、地球空间与大气“全耦合”、固体地表“跨圈层”3 大监测网(图 2),支撑全球关键区域及跨圈层过程的联合观测[17]。



图 2 由科学问题牵引设计 IMCP 协同监测板块 3 大监测网

3）数据共享板块。建设“中枢+多节点”分布式全球数据中心，推动数据可发现、可访问、可互操作和可重用[19]，开展数据汇集、长期保存、模型集成和应用服务。

4）合作平台板块。创办《Space Plus》国际期刊，设立全球开放课题、访问学者基金等，构建全方位、多层次的全球科研协作网络。

4 大板块是互为支撑的有机整体，协同监测是基石，数据共享是桥梁，创新研究是牵引，合作平台是保障。

4 IMCP 的合作机制：从互信到共赢的治理方案

IMCP 4 大板块的任务回答了“做什么”，合作机制将回答不同参与方“如何共同实施”。合作机制贯穿各板块，为资源投入、联合运行和成果利用提供共同规则，将科学需求落实为可协商、可执行的合作安排。

6 项合作机制可按 4 个层次理解。多边组织构成组织基础，明确由谁共同决策；开放协作与权益对等形成参与和激励安排，明确如何投入以及如何确认贡献；标准规范与数据及成果权益保障构成运行规则，明确怎样协同以及怎样使用成果；互利共赢通过能力建设和成果回馈支持持续参与。

4.1 多边组织与共同决策，确立国际互信基石

IMCP 拟成立国际组织，承担计划决策与协调职能，使多国科学家和科研机构通过共同制定的章程参与治理。组织设计需要明确机构会员和个人会员的参与方式，以及重大科学任务、资源安排和运行规则的议事程序。国际互信应建立在程序透明、职责清晰和持续履约的基础上，并通过具体合作逐步积累[20]。

实施中，在共同科学目标下协调各方诉求，明确科学任务分工。对观测任务调整、数据政策变更等涉及多方利益事项，应设置协商与反馈程序。这种多边决策机制有助于降低合作的不确定性，为后续资源投入和长期联合运行提供组织依据，构筑国际互信的合作基石。

4.2 开放协作与多元资源投入，实现效益集成

在共同治理框架下，IMCP 秉持“多元共建、资源集成”的协作理念，鼓励各成员基于自身条件灵活贡献资源。计划允许参与国依据其科研基础、技术能力、地理位置等特点，选择不同的投入方式：既可共享现有监测设备与数据算法，也可提供关键地理位置用于建设观测站点，或开展联合研究。开放协作的重点是把分散资源与共同科学需求相匹配，使不同条件的参与方均能找到具体任务。

通过灵活多元的协作模式，IMCP 有望有效整合设备、数据、人才与地理位置等多类资源，形成覆盖全球的协同观测和研究网络，显著提升资源利用的整体效益。

4.3 权益对等与贡献激励，调动投入积极性

多元投入需要相应的贡献确认和权益安排。IMCP 可围绕资金、设备、数据、场地、技术与人才等建立透明的贡献评价办法，在共同规则下，使参与方获得与实际投入相匹配的科研参与机会、组织治理权益及成果回馈等。其中，对于地理位置独特、长期维护困难但资金投入有限的站点，应充分考虑其不可替代的观测价值。

权益对等需要在合作前明确约定，并在实施过程中依据实际履约情况评估调整。通过构建清晰的“多投多得”对价机制，确保国际伙伴的实质性投入能够直接、透明地转化为相应的科研治理与学术权益，推动实现贡献与权益相匹配。

4.4 标准规范，提升协同效能

不同国家和机构的观测设备、数据格式与处理流程存在差异。IMCP 坚持“准则先行”，将标准协调作为协同运行的重要基础。由国际组织联合多国科学家共同制定或选用统一的空间环境数据政策、元数据规范与交换协议，解决跨国、跨设备、跨系统的数据兼容性问题，使数据能够相互理解、比较和使用。标准规范既服务于协同监测，也支持后续模型集成和跨区域科学研究。

这一机制让空间天气科学大数据能够在一个共同的“语言环境”下工作，汇聚全球碎片化的观测数据，构建覆盖多领域、多尺度的全球空间天气数据库群，提升数据质量和协同运行效能。

4.5 数据与成果权益保障

数据能够交换，并不意味着其使用条件已经明确。为切实维护全球科学家的科研权益，IMCP 拟采用全球分布式数据共享架构。该架构提供技术条件，数据开放仍需依托参与方共同认可的政策，明确可共

享的数据类别、访问条件、使用许可和相应责任。如此,针对国际合作中普遍存在的数据主权与科研产权顾虑,可以做到“在保留数据本地控制权的前提下进行全球流转”,缓解参与方对数据主权与科研权益的顾虑,促进数据的开放利用。

联合观测与研究还应事先约定数据引用、论文署名、算法和模型使用、知识产权归属以及争议处理方式。对数据生产、长期维护和质量控制等工作,应建立可追溯的贡献记录。通过将访问规则与成果权益安排衔接起来,使参与方能够判断投入后的责任与收益,为数据共享板块的持续运行提供制度保障。

4.6 互利共赢与持续参与

如何保障大科学计划的长效可持续运行,关键是资源投入产生参与方可获得、可使用的回馈。IMCP可通过数据产品、技术支持、联合研究和人才培养,支持不同科研基础的伙伴持续参与。对于具备关键地理条件但技术力量相对薄弱的地区,应将设备维护培训、数据分析支持与科研合作结合起来,增强当地团队的运行和研究能力。依托 IMCP 大科学计划,充分利用其《Space Plus》、学术交流平台,IMCP 可促进成果传播和人才成长,增强参与方持续合作的动力,构建起长期稳定、可持续发展的国际科研共同体。

从共同制定规则、确认多元投入,到依照统一标准开展联合观测和数据使用,再到通过科研成果、技术支持与人才培养回馈参与方,6 项机制构成相互衔接的合作过程。实施中可选择具备条件的节点先行开展观测与数据协作,评估数据质量、规则执行和伙伴收益,再据此调整并扩大合作。通过将反馈纳入后续任务和规则修订,逐步形成稳定、可持续的国际科研共同体。

5 IMCP 带来的科学价值和发展机遇

IMCP 是认知日地空间环境的创新引擎,更是积极响应联合国可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs)、造福全人类的示范性大科学基础设施。它在保障全球空间资产安全、驱动未来经济发展、凝聚全球多边科技治理共识等方面将发挥重要作用[21−23]。

构建日地系统全球监测链,解码空间天气过程与规律,支撑宜居地球研究。IMCP 打破传统学科壁垒,在时间和空间维度上对日地空间环境研究进行了创新性拓展。该计划将执行 1 个太阳活动周以上,系统探究空间天气在极端复杂多变周期下的特征与演化规律,为全球空间科学团体持续稳定地提供覆盖多圈层的高质量常规观测数据与科学应用服务,揭示空间天气在不同太阳活动阶段的长期演化特征与规律。同时,通过研究地球磁场、大气及其与空间环境的耦合过程,为认识地球宜居环境的形成与维持机制提供观测依据。

构筑空间环境预警底座,服务深空探索与“双空经济”。依托全球分布式地基观测网络,IMCP 能够深度剖析日地空间全过程的能量耦合规律,更打造了服务人类空间活动的安全“底座”[24]:向外,通过对太阳爆发源区及高能粒子行星际传播路径的建模预测,为全球载人航天、月球及火星探测等重大任务提供不可或缺的行星际背景环境预警;向内,通过监测电离层及中高层大气扰动,为商业航天、卫星组网等空间经济活动提供环境信息,并支持导航误差评估与修正,为无人机物流、通用航空等低空经济活动的运行安全提供支持。

探索多边科技合作路径,贡献全球科技治理的中国方案。IMCP 探索出一种由中国科学家发起、全球多国共同治理、科学成果共同受益的国际大科学计划运行路径。IMCP 在联合观测与科研协作的基础上,依托全球性多圈层观测体系,采取基于国际组织的包容性合作路径,通过共同议事、多元投入、贡献确认、标准协商和成果权益保障,有望为不同资源条件的参与方提供持续合作的制度空间。同时,通过开放数据、联合研究与人才培养,支持科研资源相对薄弱的参与方提升能力,促进各方从共享科研成果逐步走向共同生产知识、共同参与治理。

IMCP 的治理价值不仅在于推动跨国科研协作,更在于探索如何将共同科学目标转化为兼顾效率、公平与可持续性的合作制度。通过观测数据共享、预报模型协同和服务能力建设,推动科学数据与知识向服务全球的公共产品转化,为空间天气风险应对及相关公共决策提供支撑。在运行过程中,持续检验和完善多边协商、责任分担与利益协调机制,形成可供其他国际大科学计划借鉴的组织经验与制度安排,以务实

的科技合作践行“人类命运共同体”理念,为全球科技治理贡献中国方案与实践经验。

6 结语:超越子午圈,连接全人类

面向未来,IMCP 将组织全球数千名科学家,依托国际化、协同化的地基与空间观测网络,开展至少 1 个完整太阳活动周期以上的日地空间环境连续监测与科学研究,建立长期、连续、多要素、多圈层的全球观测数据体系。

在下一步计划中,IMCP 将以全球监测链为骨干,逐步拓展全球多经度、多纬度协同观测网络,强化地基观测与卫星探测的协同,推进观测设备、数据格式、质量控制和科学产品标准化。通过建设开放共享的国际数据与科学研究平台,开展全球协同观测、重大事件联合研究、长期变化分析和数值模拟,重点突破太阳风能量输入与地球空间响应的定量关系、空间天气跨区域传播与演化、多圈层能量耦合及其对地球环境的影响等关键科学问题,形成具有国际影响力的原创性科学成果和可持续发展的国际合作机制。

未来的 IMCP,将不再只是中国发起的科学计划,将成为支撑联合国可持续发展目标,服务全人类的全球空间天气治理的基础设施。通过持续的重大原创发现与跨圈层认知突破,IMCP 将打破学科界限与地缘篱笆,记录着太阳与地球的律动,指引着人类探索星辰大海的征程,成为人类命运共同体在日地空间中的生动实践。

致谢: 国际子午圈大科学计划和国家重大科技基础设施子午工程支持。

参考文献(References)

[1] Wang C, Xu J Y, Chen Z Q, et al. China's ground-based space environment monitoring network: Chinese Meridian Project (CMP)[J]. Space Weather, 2024, 22(7): e2024SW003972.

[2] Wang C, Chen Z Q, Xu J Y. Introduction to Chinese meridian project-phase II[J]. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(5): 718.

[3] Wang C, Chen Z Q, Xu J Y. Recent advances in research of the Chinese meridian project[J]. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(5): 679-690.

[4] Wang C, Xu J Y, Liu L B, et al. Contribution of the Chinese Meridian Project to space environment research: Highlights and perspectives[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(7): 1423-1438.

[5] Wang C. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. Space Weather, 2010, 8(8): S08001.

[6] Liu W, Wang C, Shen X H, et al. International meridian circle program[J]. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(5): 723-725.

[7] Liu W, Blanc M, Wang C, et al. Scientific challenges and instrumentation for the international meridian circle program[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 64(12): 2090-2097.

[8] Liu W, Michel B, Wang C, et al. Progress of international meridian circle program[J]. Chinese Journal of Space Science, 2022, 42(4): 584-587.

[9] Wang C, Blanc M, Zhang S R, et al. Progress of international meridian circle program[J]. Chinese Journal of Space Science, 2024, 44(4): 741-745.

[10] Temmer M. Space weather: The solar perspective[J]. Living Reviews in Solar Physics, 2021, 18(1): 4.

[11] Pulkkinen T. Space weather: Terrestrial perspective[J]. Living Reviews in Solar Physics, 2007, 4(1): 1.

[12] Schrijver C J, Kauristie K, Aylward A D, et al. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS[J]. Advances in Space Research, 2015, 55(12): 2745-2807.

[13] Lester M. SuperDARN: An example of a network approach to geospace science in the twenty-first century[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, 70(18): 2309-2323.

[14] Chisham G, Lester M, Milan S E, et al. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): Scientific achievements, new techniques and future directions[J]. Surveys in Geophysics, 2007, 28(1): 33-109.

[15] Nishitani N, Ruohoniemi J M, Lester M, et al. Review of the accomplishments of mid-latitude Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF radars[J]. Progress in Earth and Planetary Science, 2019, 6(1): 27.

[16] Jakowski N, Béniguel Y, De Franceschi G, et al. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques[J]. Journal of Space Weather and Space Climate, 2012, 2: A22.

[17] Sun W J, Wu B Y, Wu Z, et al. IONISE: An ionospheric observational network for irregularity and scintillation in east and Southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2020, 125(8): e2020JA028055.

[18] Zhang J J, Lan A L, Yan J Y, et al. Development of the Chinese dual auroral radar network and preliminary results [J]. Space Weather, 2024, 22(10): e2024SW004131.
[19] Wilkinson M D, Dumontier M, Aalbersberg I J, et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship[J]. Scientific Data, 2016, 3: 160018.
[20] Lester M. The Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): An overview of its development and science[J]. Advances in Polar Science, 2013, 24(1): 1−11.
[21] National Research Council. Severe space weather events—understanding societal and economic impacts: A workshop report[R]. Washington, D C: The National Academies Press, 2008.
[22] United Nations Office for Outer Space Affairs. Space weather: User needs and applications[R]. Vienna: United Nations, 2017.
[23] Kuznetsova M M, Bisi M M, Opgenoorth H J, et al. The COSPAR international space weather action teams (ISWAT) initiative: A driving force for the COSPAR space weather roadmap[J]. Advances in Space Research, 2026, doi: 10.1016/j.asr.2026.04.041.
[24] Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development[R]. New York: United Nations, 2015.

Exploring the cooperation logic and implementation pathways for the International Meridian Circle Program

WANG Chi, REN Liwen*, YANG Fang, FAN Quanlin, ZHANG Qinghe, LIU William Weining, LI Hui

National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Space weather is a global phenomenon that poses systemic risks to modern space activities and associated infrastructure, highlighting the importance of globally coordinated observations and research. The International Meridian Circle Program (IMCP) aims to address global monitoring and scientific research needs by establishing a cross−regional, multidisciplinary collaborative observation network. This paper systematically outlines the scientific and application objectives of IMCP, presents the layout of its four task areas (innovative research, collaborative monitoring, data sharing, and cooperation platforms), and analyzes the international cooperation requirements and pathways for implementing these tasks. It proposes governance approaches based on six mechanisms: multilateral organization, open collaboration, equitable rights and interests, standards and norms, protection of rights and interests in data and research outputs, and mutually beneficial cooperation. This cooperation model can bring together observation resources and research expertise worldwide, facilitate the transformation of scientific data and knowledge into public service products, support global space activities and the development of the space economy, and contribute to developing a Chinese approach to the organization and implementation of international large−scale scientific programs and global science and technology governance.

Keywords space weather; International Meridian Circle Program; international science and technology cooperation; Ground−Based Monitoring Network; international organization; solar−terrestrial coupling

（责任编辑 傅雪）