空间科学领域开放科学行动及其对科学数据中心的启示

许琦[123] 胡晓彦[123*] 胥鑫[12] 李云龙[12] 赵昆华[4] 邹自明[12] 佟继周[12] 汤惟玮[12]

1 (中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)
2（国家空间科学数据中心 北京 100190 ）
3 (中国科学院大学 北京 100049)
4（中国科学院文献情报中心 北京 100190）

摘 要 为把握全球开放科学发展趋势，推动空间科学领域创新活力，本文系统调研了空间科学领域主要国家和机构的开放科学行动，旨在明确当前进展、识别差异，并为科学数据中心的未来发展提供参考。本文采用综合文献调研与案例剖析，重点梳理了美国、加拿大、欧洲等空间强国政府机构主导的开放科学战略与行动，以及领域学术出版机构在开放获取和开放数据方面的实践举措；同时以国家空间科学数据中心为代表，分析科学数据中心作为开放科学实施主体在我国的具体贡献。通过与全球发展现状的对比，以及新时期开放科学与新型科研范式相互促进的特征分析，提出了科学数据中心未来进一步推进实施开放科学行动的若干启示，以期为空间科学领域发展提供更开放、协同、创新的支撑与服务。

关键词 开放科学 空间科学 数据出版 科研范式 开放研究基础设施 开放创新生态
中图分类号 V11

最新录用

Open science action in space science and its enlightenment for science data center

XU Qi[1, 2] HU Xiaoyan[1, 2,3] XU Xin[1, 2] LI Yunlong[1, 2] ZHAO Kunhua[4]
ZOU Ziming[1, 2] TONG Jizhou[1, 2] TANG Weiwei[1, 2]

1 (*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)
2 (*National Space Science Data Center, Beijing 100190*)
3(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)*
4(*National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

* 基金项目：国家自然科学基金科技活动项目“战略研究类：空间科学领域的开放科学发展及其影响战略调研”（42242403）
投稿日期：2024-01-24
E-mail：huxiaoyan@nssc.ac.cn

Abstract Open science has emerged as a new wave of global consensus, with major scientific and technological powers actively formulating policies and implementing practical initiatives to advance open science. The field of space science is currently at a critical juncture of research paradigm transformation, where the development of open science is expected to inject renewed vitality into innovative activities. This paper presents a comprehensive investigation and systematic review of global open science actions in the space sciences over the past decade. It focuses on the open science initiatives led by government agencies of major spacefaring nations, particularly the United States (NASA), Canada (CSA), and Europe (ESA and national agencies), as well as those launched by academic publishing entities and research communities in the field, including AGU, Springer Nature, and Elsevier. Key strategic elements, policy frameworks, infrastructure development, and ecosystem-building efforts are analyzed in depth.The study reveals that while the United States and Canada have adopted top-down, policy-driven approaches with comprehensive action plans, European countries have taken relatively conservative yet progressively evolving paths primarily through pilot demonstrations. In contrast, other regions, including Asia-Pacific, still lack systematic national-level open science strategies for space sciences and remain largely at the stage of project-level experimental practices. Quantitative analysis of open access publications from 2014 to 2023 shows a remarkable surge in OA papers in space sciences, which reflecting the accelerating momentum of open science adoption. Taking the Chinese National Space Science Data Center (NSSDC) as a representative case, this paper elaborates on the concrete contributions of scientific data centers as key implementing bodies in promoting open data sharing, data publishing, open research infrastructure development, and collaborative partnerships with academic publishers. By comparing China's current progress with global developments and analyzing the mutually reinforcing relationship between open science and emerging research paradigms, particularly in the context of data-intensive science and AI-driven discovery, this paper identifies critical challenges including balancing openness with national security imperatives, addressing data governance and valuation issues, and fostering broader stakeholder engagement. Finally, the paper proposes several recommendations for scientific data centers to further advance open science actions, aiming to provide more open, collaborative, and innovative support and services for the future development of space sciences.

Key words open science; space science; data publication; research paradigm; open research infrastructure; open innovation ecosystem

最新录用

0. 引言

开放科学理念自 16 世纪末开始萌芽，经历了数个世纪的理论发展与实践探索。虽然关于开放科学的定义、内涵、要素与发展路径，不同研究者有不同的认知，但开放科学对现代

科学尤其是大科学时代科学创新的积极作用，已受到广泛认可[1]。Burgelman J-C 等人[2]的研究表明，开放科学有着增加科学传播速度、便于评估科学结果的可重复性、最大限度地减少重复性工作、提升效率和创新等诸多益处。2021 年 11 月，联合国教科文组织 193 个成员国批准了《开放科学建议书》[3],在求同存异的原则下，将开放科学定义为一个集各种运动和实践于一体的包容性架构，旨在实现人人皆可公开使用、获取和重复使用多种语言的科学知识，为了科学和社会的利益增进科学合作和信息共享，并向传统科学界以外的社会行为者开放科学知识的创造、评估和传播进程。《开放科学建议书》的发布，标志着开放科学迎来全球共识的新浪潮。根据《开放科学建议书》提出的主要支柱与行动领域，开放科学的主要内涵包括开放科学出版物、开放数据、开放教育资源、开放软件/硬件以及开放科学基础设施，开放科学行动的参与者涉及科学界内的科学家、科技管理机构、科学数据中心、学术出版机构等不同类型主体以及科学界之外的公众、决策者、企业等更广泛的利益相关方，并且开放科学行动注重营造开放、包容、协同的良性生态，包括政策环境、科学文化、人才培养与跨领域协同合作等诸多方面。讨论开放科学相关议题时，经常出现的“开放获取”（Open Access，OA）一词狭义上指开放科学出版物（即科研资助产生的最终成果）[4]，而“开源”（Open Source，即开放源代码）则是开放软件的最主要形式之一。

世界科技强国已陆续形成国家层面的开放科学相关政策与行动计划。2022 年，美国白宫科技政策办公室发布最新开放科学政策指南[5]，要求联邦政府资助的研究所产生的出版物及其支撑数据立即开放，并且不设公共访问限制。欧盟自 2013 年起开始进行开放科学探索与研究，据欧盟《2020-2024 年研究与创新战略》[6]显示，开放科学已成为欧盟委员会政策支撑的优先事项，并通过“地平线 2020 计划”落实开放科学相关目标。加拿大政府公开承诺将开放科学纳入第三和第四个国家行动计划，2020 年加拿大科学首席顾问办公室正式发布《开放科学路线图》[7]，提出了国家层面的战略布局，并明确了联邦政府各部门与机构的开放科学实施建议。2021 年，法国通过了《第二阶段国家开放科学计划》[8]，在第一阶段开放科学计划的基础上，明确提出了开放出版物、开放数据、开源代码和提升科学界开放科学认识等重点方向。同时，学术出版界与科研共同体对开放科学的呼声也日益高涨[9]。

我国历来是开放科学的积极倡导者与拥护者。2021 年修订的《中国人民共和国科学技术进步法》明确提出要“推动开放科学的发展” [10]。自 2012 年起连续举办的中国开放获取推介周（China OA WEEK）活动[11]，围绕开放获取、开放知识、开放数据、基础设施、开源代码等主题进行学术探讨，推动我国科学界、文献情报界、出版界等领域的跨界交流。2021 年，中国科学院牵头启动“全球开放科学云大科学培育计划”，推动包括中国在内的全球开放科学基础设施之间的互联互通。2022 年，中国科学技术协会牵头联合学术机构、科技团体、科技图情机构、国内外出版机构等多家单位，成立了开放科学促进联合体，标志着我国科学界、出版界正在积极融入全球开放科学行动。

空间科学是以空间飞行器为主要平台，探索宇宙空间内物理、天文、生命等自然现象并对其潜在规律开展研究的学科[12]，是世界强国高度重视并争相支持的重要学科领域。推动空间科学领域的开放科学实践与国际合作有助于空间科学发展取得新的突破和更大的进步。尽管面临着国际竞争局势与权益保护等诸多挑战，空间科学领域的国际主要机构与组织长期以来仍为开放科学作出了诸多努力。特别是近几年全球开放科学蓬勃发展的态势下，世界主要

空间强国均启动部署了开放科学相关战略行动与计划项目，推动本领域开放科学实践，加速领域科技创新进程。本文对近十年全球空间科学领域开放科学行动计划进行系统阐述，并聚焦如何发挥科学数据中心在开放科学行动中的积极作用，提出若干思考与启示。

1. 世界主要空间强国政府机构主导的开放科学行动

1.1 美国宇航局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）开放科学行动

2023 年 1 月，美国白宫联合 NASA 在内的 10 个联邦机构、超过 85 所大学和其他组织形成联盟，将 2023 年定为开放科学年[13]。NASA 积极响应开放科学相关行动，发布《开源科学倡议》（Open-Scource Science Initiative, OSSI）[14]，通过一系列综合性的开放科学行动项目，促进和支持科学走向开放。该倡议虽以“开源科学”的名义提出，但从其目标与具体行动看，正对应了开放科学的实际内涵。

1）开放生态方面。OSSI 以加速科学社区向包容性的开放科学文化转型为重要方向，制定开放科学转型（Transform to Open Science，TOPS）专项社区协调任务，投入共计四千万美元支持，通过社区建设、社交媒体、会议活动、在线课程、徽章认证等一系列能改变当前范式的事件和活动，加速科学界参与开放科学实践，引发范式变革并激励开放科学发展。2023 年，NASA 发布 “开放科学 101” （Open Science 101）课程，覆盖开放科学内涵、开放科学工具与资源、开放数据、开源代码、公开结果等五个方面，帮助科研人员、学生和公众科学家掌握如何制定数据管理计划、如何共享数据、软件和工具等开放科学相关技能。

2）政策制定方面。早在 2019 年，NASA 科学任务局（Science Mission Directorate，SMD）就根据科学社区建议发布了《2019-2024 数据管理与计算促进变革性科学战略》[15]，提出了通过科学数据与计算系统的不断发展促进变革性开放科学的 3 大战略目标和 11 项战略。随着 OSSI 的实施， NASA 于 2023 年更新发布了《SPD-41a：SMD 科学信息政策》[16]，进一步明确了 NASA 资助的科学活动产生的科学出版物、数据、软件等科学信息的开放共享要求。在 SPD-41a 指导下，NASA 的天文学、生物与物理学、地球科学、太阳物理和行星科学 5 个 SMD 部门对各自的科学数据、信息及软件政策进行了更新完善。

3）开放数据方面。NASA 明确了天文、行星科学、太阳物理、地球物理等学科领域的开放数据范围，并建立了统一科学数据门户（NASA Science Data Portal）[1]，呈现了面向天文学、生物与物理学、地球科学、太阳物理、行星科学、高端计算、公众科学 [2]等不同学科或主题的数据档案库，描述每个档案库的数据内容、数据来源、探测方式和手段等信息，并进一步提供更细粒度的数据目录和访问地址。

4）开放获取方面。NASA 打造了 NASA Science Explorer 数字图书馆 [3]，面向天文学、

[1] https://science.data.nasa.gov/

[2] NASA 公众科学项目（Citizen Science Projects）是科学家和感兴趣的公众之间的合作项目，通过这些合作，一些公众或志愿者已经做出了数千项重要的科学发现。NASA 公民科学项目访问页面 https://science.nasa.gov/citizen-science/

[3] https://scixplorer.org/

地球科学、太阳物理学、行星科学等学科的科研人员，提供由 NASA 科学任务及相应科学数据支持形成的科学成果（即科学出版物）的检索服务。

5）开放基础设施方面。NASA 定制了科学发现搜索引擎（Science Discovery Engine）[4]，用于统一检索存储于不同数据库的天文学、生物与物理学、地球科学、太阳物理和行星科学等不同学科的科学信息，检索对象除大量科学数据外，还包括相关的文档与代码、模型、图像、视频、软件或数据分析工具等，并支持多种类型的条件检索。

6）信息计算能力方面。OSSI 支持了核心数据和计算服务计划 (Core Data and Computing Services Program，CDCSP)，将 NASA 所有 SMD 的数据与分析服务能力集成到模块化的架构中，匹配高端计算能力，供所有 SMD 部门重复使用这些数据与服务。

7）人工智能技术加速科学研究方面。由所有 SMD 和高端计算项目的 AI 专家组成了 SMD AI 工作组，以利用大量数据和计算来加速 NASA 科学领域的 AI 技术发展为目标，开展了一系列探索与实践，包括分析研究当前数据和计算的整体框架图，制定推动数据、模型和计算方面的跨部门 AI 协作计划，开展前沿技术态势研讨，并与企业联手建立 NASA 科学大语言模型工作组，探索不同的通用语言大模型如何满足科学应用分析需求等。

1.2 加拿大航天局（Canadian Space Agency，CSA）开放科学行动

加拿大的国家级政策《开放科学行动路线》[7]明确提出，包括 CSA 在内的联邦政府各部门和机构应在 2021 年 6 月之前制定各部门的开放科学行动计划。2021 年，CSA 发布了《2021-2024 开放科学行动计划》[17]，提出 CSA 开放科学系统模型，明确了第一优先级为开放数据、第二优先级为开放获取和第三优先级为利益相关方参与的 3 大行动方向和 11 项行动实施策略。

1）开放数据方面。CSA 与其专业数据中心合作，推出了 CSA 开放数据门户网站（Open data and information Portal）[5]，发布了 CSA 资助的多项气候科学任务的数据产品清单。将实现科学数据的 FAIR 原则[18]，即可发现（Findable）、可访问（Accessible）、可互操作（Interoperable）和可重用（Reusable）作为重点行动，对其数据资产进行清点，制定实施 FAIR 原则的战略并形成相关工具。为加强跨部门数据管理工作，探索建立空间数据科学咨询委员会。针对地球观测（Earth observation，EO）数据开放范围受到的相关法律法规约束问题，与其他 17 个联邦部门机构合作以调整数据政策和规则，进一步提升数据开放程度。

2）开放获取方面。通过评估 CSA 的开放获取状态和资助出版物的比率、建立审查制度以鼓励出版物的开放获取，发布开放获取出版的通用工具等相关措施，提高作者对开放科学的参与度，提高联邦政府资助的出版物的可获取性，促进公众对产出的访问。

3）开放生态方面。CSA 鼓励利益相关方共同参与，营造开放创新的生态文化，促进科学成果的透明性、包容性。对外，组织地球和空间领域相关活动，提供开放工具，培育下一代青年科学家开放共享理念；对内，改进组织内部协作方式，通过提供开放科学培训、扩大利益相关方合作范围等方式，培养包容、透明的开放创新生态文化。

1.3 欧洲航天局（European Space Agency，ESA）开放科学行动

欧盟《2020-2024 年研究与创新战略》[6]核心主题之一——“欧洲数字未来”明确了在

[4] https://sciencediscoveryengine.nasa.gov/app/nasa-sba-smd/#/home

[5] https://donnees-data.asc-csa.gc.ca/dataset/

最新录用

数字化进程中，空间科学和地球观测是该政策和地平线战略支持的重点方向之一。自 2017 年起，ESA 通过实施 ESA SPACE4.0 规划以及与欧洲开放科学云（European Open Science Cloud，EOSC）[6]合作，推动数据与基础设施的进一步开放。

1）政策制定方面。2017 年，ESA 发布《数据与信息开放获取的政策》[19]，正式宣布图像、视频和一定范围的数据采用开放访问政策。

2）开放数据方面。ESA 在其建设的 Open Access 平台 [7]发布行星科学、天文学、空间地球科学等多学科领域的图像与视频数据。针对天文领域，ESA 建立了开放科学发现门户 ESASky[8]，作为天文学数据档案库的检索界面，提供超过 50 万张图像、30 万个光谱和超过 10 亿个目录源检索与开放获取；针对空间地球科学领域，ESA 公布了 EO 开放科学目录 [9]，包含了一系列公开可用的地球科学产品、数据集和资源目录；针对气候环境领域，ESA 通过气候变化计划（Climate Change Initiative，CCI）建立了开放数据门户 [10]。

3）开放基础设施方面。ESA EO 通过与 EOSC 合作，打造面向地球观测数据存储和计算的基础设施 EOSC-Hub[20]，实现在大型用户社区之间的数据共享、计算与存储。

4）开放生态方面。ESA EO 自 2015 年起多次组织 EO 开放科学咨询会议，探讨包括开放工具和软件、数据密集型科学（data-intensive science）、公众科学、新一代 EO 和数据科学家教育等方面议题。

1.4 欧洲其他国家政府机构开放科学行动

NEANIAS（Novel EOSC Services for Emerging Atmosphere, Underwater & Space Challenges）[11]是 EOSC 计划下的一个项目，针对大气、水下和空间地球科学领域，吸引众多科研社区、商业团体、专业人士和政府等主体共同推进开放科学实践，为上述三个领域的前沿科学资源和科研活动提供主题服务，为科学创新、技术进步、政策制定和业务应用作出贡献。其中面向空间地球科学领域，提供集成在 EOSC 上的可操作的工具与平台服务，包括 FAIR 数据管理和可视化、多维空间影像服务的制图和拼接、基于机器学习的大型地貌图结构检测。

法国航天局（National Centre for Space Studies，CNES）正在参与由法国政府牵头组织的地球系统数据服务基础设施——DATA TERRA 计划[21]。该计划旨在提供大气、气候、海洋学、地震和空间数据，使科学界以及国际公共和社会机构能够访问多源数据集以及相关的产品和服务。该研究基础设施将建设四个交互数据集群——AERIS for Atmosphere、ODATIS for Ocean、FORM@TER for Solid Earth 和 THEIA for Continental Surfaces，用于支持数据发现、访问与管理。

1.5 其他国家与地区的开放科学行动

根据目前公开可查的资料，亚太等其他区域国家尚未形成政府机构主导的、体系化的空间科学领域开放科学政策或路线图，主要行动以自发的、散点式的示范性实践为主。如日本

[6] https://eosc-portal.eu/
[7] https://open.esa.int/
[8] http://sky.esa.int/
[9] https://opensciencedata.esa.int/
[10] https://climate.esa.int/en/data/#/dashboard
[11] https://www.neanias.eu/

最新录用

航天局（Japan Aerospace Exploration Agency，JAXA）加入了 NASA 和 ESA 主导的公众科学合作项目 Earth Observing Dashboard 计划[12]，加强 EO 数据分析和信息共享，以便向决策者和公众提供准确及时的信息；巴西空间研究院（National Institute for Space Research, INPE）启动 Brazil Data Cube 项目[13]，生产 AI 就绪的数据集（Analysis-ready data，ARD），研发计算平台，利用人工智能、机器学习和图像时间序列分析来处理和分析大量 EO 数据等；中国科学院可持续发展科学卫星 1 号（SDGSAT-1）于 2022 年 9 月启动“SDGSAT-1 开放科学计划”，卫星数据面向全球开放与共享，为国际社会特别是发展中国家开展可持续发展目标科学研究、落实联合国 2030 年议程作出特有贡献。从学科范畴看，上述示范性实践主要集中在空间地球科学领域，而针对日地空间、行星科学、天文等学科的相对较少；从开放科学的要素内涵看，这些实践主要侧重于单一项目的开放数据或基础设施建设，而缺少跨项目、跨领域、更广泛的资源开放、设施建设和生态营造方面的行动。

2. 学术出版界与领域科研共同体的开放科学行动

2.1 空间科学领域科学出版物开放获取

作为开放科学的重要参与者和利益相关方，学术出版界将推动科学出版物的开放获取作为实现开放科学的有效途径之一。开放获取（OA）可概括为让读者可以免费获取并合法使用期刊论文、专著等科学出版物，常见的开放获取出版模式包括金色开放获取（Gold OA，即论文发表后立即在期刊网站公开）、绿色开放获取（Green OA，即论文发表后将最终录用手稿存储到机构知识库提供开放获取）、复合开放获取（Hybrid OA，即期刊同时发布 OA 内容和付费订阅内容）等[4]。

空间科学领域学术成果出版相关的主要机构如美国地球物理学会（American Geophysical Union，AGU）、施普林格·自然（Springer Nature）、爱思唯尔（Elsevier）等，近年来正积极推动旗下期刊及论文的开放获取。根据官网显示，截止 2023 年底 AGU 旗下已拥有 12 种金色 OA 期刊。Springer Nature 在其发布的期刊开放获取政策[23]（Open access policies for journals）中倡导开放获取，并在 OA 资助和政策等方面提供免费咨询服务，目前旗下共有约 2200 本传统期刊提供复合 OA 模式，此外还拥有大约 600 本金色 OA 期刊。2021 年，Springer Nature 成为全球第一家发表了 100 万篇金色开放获取原创研究和综述文章的出版机构。根据 Elsevier 官网信息（Open access information for journal authors）[14]，其旗下 2800 种期刊几乎都实现了 OA 出版，其中有 700 多种金色 OA 期刊，仅 2022 年一年发表了超过 15 万篇金色 OA 文章。

随着开放科学行动的推进，近 10 年来，全球空间科学领域论文发表数量虽整体保持稳定，但 OA 论文占比不断上升，并在 2022 年左右出现激增。2014 年至 2023 年，世界空间科学领域共发文 158,775 篇，其中 OA 论文共计 28,906 篇，所占份额为 18.21%。其中 OA 论

[12] https://eodashboard.org/

[13] http://www.brazildatacube.org/en/about-brazil-data-cube-2/

[14] https://www.elsevier.com/zh-cn/researcher/author/open-access

最新录用

文数量从 2014 年的 544 篇增长到 2023 年的 8,824 篇，OA 论文占所有论文的比例也相应从 3.79%增长至 58.35%，OA 论文年均增长 36.29%。（见图 1）。

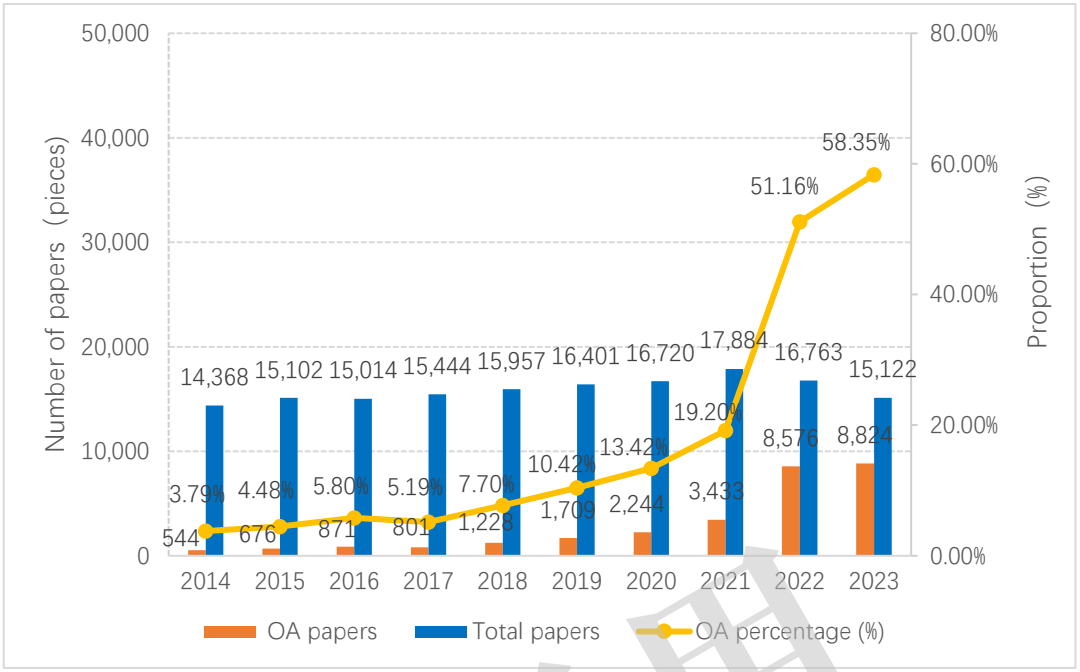


图 1 世界空间科学领域 OA 论文数量总体趋势

Fig 1 General trend in the number of OA papers in the world's space sciences

从国家/区域视角来看，近 10 年空间科学领域 OA 论文的产出国家中，美国 OA 论文增长数量最多，中国 OA 论文增长最快。2023 年相比 2014 年，TOP10 国家中，中国空间科学领域 OA 论文数量增长最快，增长了 46.9 倍，年均增速 53.7%，相应世界排名也从第 8 名提升至第 2 名。（见图 2）

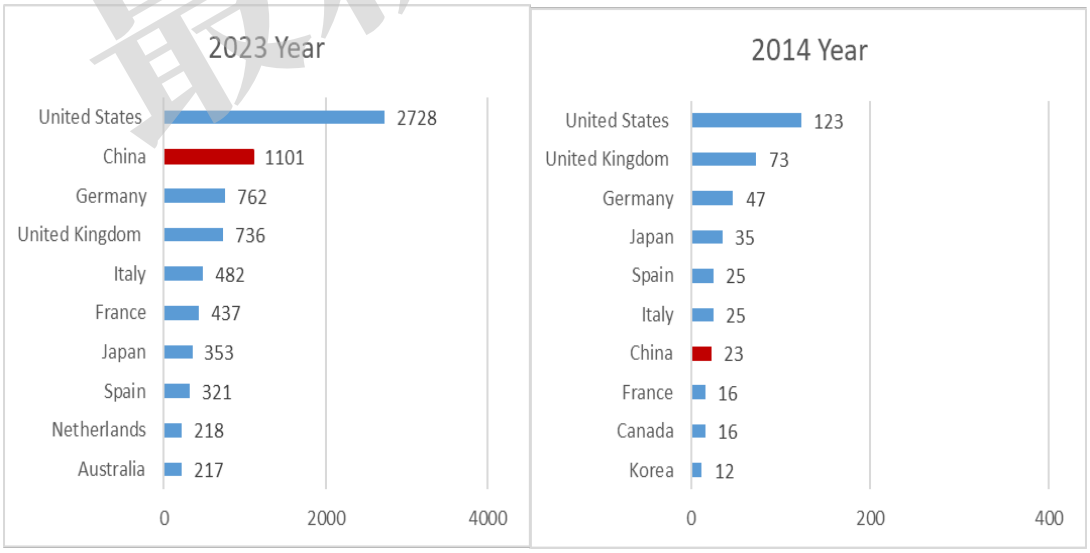


图 2 2014 年、2023 年空间科学领域 OA 论文数量 TOP10 国家（地区）

Fig 2 Top 10 countries (regions) in terms of number of OA papers in space science, 2014, 2023

2.2 空间科学领域科学出版物关联数据开放

学术出版界不仅致力于最终科研成果的开放，也不断探索科学研究从实验、验证到传播、应用的全过程开放。科学出版物关联的科学数据作为关键科研要素，成为近年来学术出版界

与科研共同体共同推动开放的重点方向。

1）AGU。Stall S[22]等人的报告表明 AGU 长期致力于开放科学的承诺，并介绍了 AGU 已经开展的增加科研透明性与开放性的相关努力。2014 年，AGU 主导发起的地球和空间科学出版数据联盟（Coalition for Publishing Data in the Earth and Space Sciences，COPDESS），联合领域相关基金会、学术出版机构、仓储库、学术组织和研究人员，提出了关于支持和遵循开放数据最佳实践的倡议《地球、空间与环境科学承诺声明》[23]，呼吁共同致力于数据持久保存与引用，并推动实施赋能 FAIR 数据项目（Enabling FAIR Data Project）[15]，致力于实现领域科研成果的开放与 FAIR。2019 年，AGU 在其最新的数据立场声明[24]中倡导数据的开放透明，提出将数据作为世界遗产来保护。同年，AGU 在其官方出版政策[25]中明确要求，旗下所有期刊的作者在投稿和发表论文的同时，将论文关联数据公开存储并适时发布共享。

2）Springer Nature。2016 年，Springer Nature 发布了科学数据政策标准框架[26]，为旗下期刊提供通用的数据政策模板，鼓励通过仓储库共享数据、提供数据引用规范、要求提供数据可用性声明等行动。2023 年，Springer Nature 开展了一系列开放数据举措[27]，包括启动标准化数据政策，陆续在旗下 3,500 种期刊中嵌入数据可用性声明要求，以提高数据的透明度，增强科学记录可信度。此外，扩大与 figshare[16]等开放获取平台合作，将旗下 35 个期刊与 figshare 平台上开放的数据集进行对接。

3）Elsevier。2017 年起，Elsevier 在其数据政策[28]中倡议，科学数据应尽可能免费提供给所有研究人员，支持将科学数据作为单独的、经过同行评审的成果发布。

随着相关政策与倡议的实施推进，领域科研人员对于将科学研究相关数据进行开放的理念认同也得到了加强。根据 Springer Nature 等机构联合发布的《2023 年度开放数据状况报告》调查显示，在全球范围收到的 6091 份调查问卷中，89%的受访者表示愿意公开他们的数据，其中天文与行星科学领域 52%的受访者、地球与环境领域 54%的受访者表示强烈支持公开科学数据[29]。

2.3 空间科学领域开源社区

领域开源社区是具有共同兴趣爱好的科学研究者为了共享开源的科学软件工具和提供自由学习交流空间所自发形成的组织。领域开源社区为科学界提供了贡献技术和创意的重要平台，改善了研究和软件开发的过程，是开放软件与代码的主要渠道。空间科学研究团体开放模型和算法源码、共享数据分析软件的核心动力来自于合作解决空间科学领域复杂问题的基本愿望。研究团体通过独立发布或向大型研究社区贡献模型、算法和工具来分享他们的工作，一方面既能提升自身团队的影响力，另一方面又能提高群体的研究效率、研究结果的准确性和一致性，形成互相协作和支持的氛围，通过正反馈促进更多团队贡献更高效、更准确、更方便用户的新工具和软件。

在共享数据、算法和模型的大氛围下，空间科学团队为领域开放研究提供了许多优秀的数据分析工具，例如含有大量著名算法的极化合成孔径雷达分析工具（Polarimetric SAR data Processing and Education Toolbox，PolSARpro）[17]；用于飞船姿态和载荷视场分析，服务过 NASA 和 ESA 多个空间科学任务的几何计算软件（Spacecraft Planet Instrument Camera-matrix

[15] https://copdess.org/enabling-fair-data-project/
[16] https://figshare.com/
[17] https://earth.esa.int/eogateway/tools/polsarpro

Events，SPICE）[18]；用于超级双极光雷达网（Super Dual Auroral Radar Network，SuperDARN）数据可视化分析的 PyDARN[19]；用于空间物理数据分析、建模和可视化的 SpacePy[20]。值得一提的是一款 40 年前开发的用于分析天文图像数据的工具（Image Reduction and Analysis Facility, IRAF）[21]，尽管这个软件的开发机构早已停止了维护工作，但由于 IRAF 深受科学家的喜爱，开源社区接管了该软件并维护至今。科学领域开源社区的运行使优秀的软件能够不断更新迭代保持活力，长久服务于科学研究。

不同空间科学研究团体或小的开源社区在开源软件上的合作也在形成功能更全更大的开放科学社区，在公众可见的空间中进行开源软件项目的决策讨论，制定开源软件的设计标准，以促进科学数据分析软件的可访问性、可靠性、科学可重复性以及相关数据的开放获取[31]。不少优秀的空间科学开源社区加入了开源合作计划，其中包括用户基数众多的天文与天体物理数据分析包 AstroPy[22]、太阳物理数据访问交互和分析工具包 SunPy[23]、通用射电数据分析包 CASA[24]等等。这些工具在统一的开放协议下持续接受各个团体的贡献，例如 AstroPy 通过开放协议收纳了 astroquery、agnpy、 atroalign、astroML 等优秀的天文数据获取与分析工具；SunPy 通过开放协议整合了 drms、sunraster、aiapy 等空间物理数据获取与分析工具。开放科学社区的融合也使开源工具逐渐发展成功能更加齐全、性能更加稳定、效率和精度更高的开放科学软件。

最新录用

3. 开放科学行动中的科学数据中心

3.1 科学数据中心是开放科学的重要实施主体

开放科学是一个多主体参与的活动。杨卫[1]等人的研究指出，开放科学使学术共同体的边界愈加模糊，既包容科学研究系统内跨领域、跨机构、跨地区的合作和知识分享，也包容科学研究系统与不同利益相关体、甚至是非科学研究系统的参与和分享。各相关利益主体在开放科学共同价值观与多样化途径共识下采取的行动，联合营造了开放合作互惠创新的良性生态。

科学数据中心是实施开放科学的重要主体，是开放创新生态中的关键环节。一方面，科学数据中心是实施开放数据的主要载体，连结了重大科技基础设施、科研仪器、实验室平台、科研项目等科学数据产出源头，和科学研究、教育、企业等科学数据用户社区；另一方面，科学数据中心作为重要参与者，联合科技管理部门、学术出版机构、科研机构、学校和企业等主体共同推进开放出版、开源软件、开放教育资源和开放研究基础设施建设。也有研究者认为，科学数据中心属于开放数据基础设施中的一类，属于集中式数据基础设施，可支持跨学科领域的综合研究[30]。虽然对科学数据的属性从机构视角、平台视角或设施视角理解不同，但其在开放科学行动中发挥的积极作用受到广泛认同。

以政府主管的空间科学领域机构为例，2023 年，NASA 统筹开展的开放科学信息政策

[18] https://naif.jpl.nasa.gov/naif
[19] https://github.com/SuperDARN/pydarn
[20] https://spacepy.github.io
[21] https://iraf-community.github.io
[22] https://www.astropy.org
[23] https://sunpy.org
[24] https://casa.nrao.edu

制定，多学科主题数据资源联合目录发布，跨领域数据检索服务建设、基于 AI 技术加速提升数据与计算工作组组建、TOPS 开放科学课程发布等在数据与信息开放共享、基础设施建设、前沿技术探索实践、开放科学生态文化培养的诸多实践中，都离不开 NASA 不同学科数据档案库的牵头引领或深入参与。以学术出版活动为例，根据 COPDESS 官方网站[25]信息，加入 COPDESS 联盟并联合签署《地球、空间与环境科学承诺声明》的数据仓储库已有 39 个，在联盟共计 107 家机构参与者中占比近四成（见图 3）。AGU 旗下学术期刊在开放透明数据倡议指导下，截止 2024 年 1 月已认可全球 252 个数据仓储库作为其合作伙伴，2021 年末，AGU 与社区成员共同优选出 57 个形成 AGU 领域-学科仓储库推荐名单。

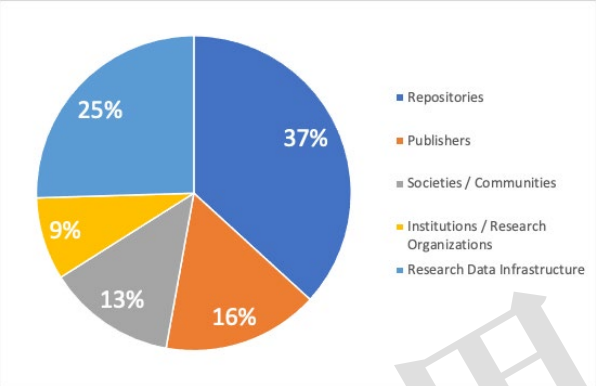


图 3 COPDESS 联盟机构参与者各类型占比

Fig 3 Percentage of COPDESS Consortium Institutional Participants by Type

3.2 国家空间科学数据中心的开放科学实践

国家空间科学数据中心（以下简称“数据中心”）作为 2019 年 6 月中国首批成立的国家科学数据中心之一，是目前中国空间科学领域唯一的国家级科学数据中心，在推动空间科学领域开放、开源、协同方面发挥了积极作用。本文以国家科学数据中心为代表，介绍科学数据中心在助力我国空间科学领域开放科学进程中的具体实践与发挥的作用。

1）空间科学数据开放共享。

数据中心以“开放为常态，不开放为例外”的共享理念，促进科学数据面向领域社区和公众普惠开放的广度和深度，同时积极探索推进数据出版模式的升级转变，引进 DOI（Digital Object Identifier）、CSTR（Common Science and Technology Resource）等多种标识体系注册认证以及 Creative Commons 等共享许可协议，在保障数据所有者权益的基础上，满足日益多样化的数据出版需求。

在推动重大任务形成的科学数据开放共享方面，数据中心参与国家重大科技基础设施——子午工程、“悟空”卫星、“慧眼”卫星、“极目”卫星、“夸父一号”卫星、“嫦娥”系列任务、“天问一号”等我国一系列空间科学任务的数据政策制定，推动其数据开放共享，受到了国内外空间科学领域科研共同体的广泛关注。在推动研究者科研过程产生的数据开放共享方面，数据中心与科学数据银行开展战略合作，面向全球空间科学领域的科研工作者、学术期刊等利益相关者，推出空间科学领域社区 ScienceDB.Space[26]，提供论文关联数据的存储、出版、共享和获取等服务。出版的数据集被 Google Dataset Search、Data Citation Index、Mendeley

[25]https://copdess.org/enabling-fair-data-project/commitment-statement-in-the-earth-space-and-environmental-sciences/signatories/

[26] https://sadr.scidb.cn/en

最新录用

Data 等多个国际数据索引库收录。

2）空间科学领域开放研究基础设施建设。

为了有效支撑空间科学数据治理与放开利用，数据中心建有融合领域科学数据、专用模型、软件工具等多类型科技资源的开放研究基础设施，面向特定学科与团体社区的不同需求打造了一系列专题服务系统，通过数据中心门户提供一站式服务，从而提升空间科学数据与专用模型、软件工具的 FAIR 化水平，使更易发现、易访问、易互操作，并促进最大化利用。

基于特定的空间科学任务，数据中心建有暗物质粒子探测卫星伽马射线数据库服务系统（DAMPE Gamma-ray Database）、国际超级双极光雷达网中国中心（SuperDARN China）、天格数据发布系统等 10 余个专题数据服务系统，提供基于任务数据特征的精细检索和访问、在线交互分析工具等服务。为了促进已开放数据的利用，协助用户更便捷地开展科学分析与研究，数据中心建有交互式分析应用环境 iSpace，集成领域常用分析算法、物理模型、计算工具和基于人工智能的事件识别与特征提取等工具包，提供基于云端的在线分析计算服务。为提高已开放资源的可发现性和可访问性，数据中心打造了空间科学虚拟观测台（Virtual Space Science Observatory, VSSO）一站式综合检索平台，提供跨系统、跨学科、分布式的数据资源与软件工具发现服务。通过 VSSO 与中国科技资源共享网、中国科学院数据门户等第三方平台实现互联互通，使数据中心已开放共享的科技资源能够被更广泛地发现，在提升科研成果影响力的同时有效促进开放资源复用。

3）与学术出版机构合作。

与国际学术出版机构合作方面，2020 年 11 月，数据中心联合签署了 COPDESS《地球、空间与环境科学承诺声明》，承诺努力实现 FAIR 数据原则，推动领域科研成果的可信化存储管理和最大化开放共享。同时，数据中心积极认证成为 AGU、Elsevier、Springer Nature 等国际著名学术出版集团认可的学科数据仓储中心，并于 2022 年 1 月入选 AGU 领域-学科仓储库推荐名单，成为中国唯二的受多期刊推荐的仓储库之一。

与国内学术出版机构合作方面，数据中心与空间科学领域核心期刊《空间科学学报》达成战略合作，成为该期刊唯一认可的数据仓储中心。2023 年，数据中心数据出版系统实现了与学报审编系统间的互联互通，在此基础上与空间科学学报开展数据社区共建共治。

同时，数据中心在国内空间科学领域引进数据论文出版模式，积极倡议领域科研人员将对科研过程产生的数据成果以论文形式进行出版，以拓展领域数据开放共享模式，加强对科学数据成果的价值认可与规范引用。2021 年 7 月，数据中心联合子午工程，在《中国科学数据》期刊推出的子午工程数据专刊，对子午工程运行多年来积累的数据产品体系与其中的优质数据集进行了系统介绍，使用户更加深入地了解子午工程数据资源。

4. 思考与启示

4.1 空间科学领域开放科学行动面临的问题与挑战

开放科学蓬勃发展的大背景下，全球空间科学领域正积极推进开放科学行动，已取得了诸多进展并初显成效。但同时，领域开放科学发展也面临着新的问题与挑战。

最新录用

1）空间科学领域具有科学的公益性属性，但同时也与国家安全、国际竞争等重大议题密切相关。如何在保障安全的前提下开放，以开放提升核心竞争力，以开放促进合作共赢，是建立领域开放科学机制过程中应关切的重要问题。

2）数据已成为第五类生产要素，数字中国等国家战略对促进数据流通、发挥数据潜能提出新的要求。如何在空间科学领域发挥“数据要素×科技创新”的乘数作用是当前面临的新挑战。开放数据不仅仅是简单的开放共享，还应解决数据要素化流通过程中的知识产权、隐私保护、价值评估和创新赋能等诸多管理与技术问题。

3）开放科学是一项多类型主体共同参与的行动，需要领域科学界及其他相关利益方的协同合作与共同努力。但从领域现状看，仍有部分科研人员、科技管理机构和学术出版机构对开放科学的理念认同不足，参与或配合开放科学行动的意愿不强。

4.2 我国空间科学领域开放科学发展需要整体行动计划

从空间科学领域正在推进的开放科学行动看，欧美空间强国从国家层面到实施主体机构均已在推进开放科学行动计划，“自上而下”打破不同管理机构和制度的壁垒，加强空间科学领域与气候、环境等交叉学科领域的融合，加速科学和应用技术发展的步伐，寻求重大科学发现。其中，美国、加拿大相关机构行动更为积极，以政策驱动进行整体布局；欧盟及欧洲各国相对保守，虽有政策指导，但在具体实施路径上以试点示范进行带动为主。相较之下，亚太等其他地区各国缺少关于空间科学领域开放科学整体发展政策指引与整体行动计划，大多为项目级、机构层面关于开放获取、开放数据、开放基础设施建设等方面的试点性实践。

我国空间科学领域在开放获取和开放数据等方面，为全球开放科学作出了积极贡献，但横向对比来看，尚未形成体系化的发展格局，对全球开放科学运动的实质性参与程度仍有待提升。如能形成整体性行动计划或发展路线图，将有效指导领域开放科学进程，对发挥我国空间科学国际影响力，充分利用全球空间领域科技资源推进我国空间科学强国建设具有重要意义。

4.3 面向科研范式变革，打造互联互通的开放研究基础设施

大数据与人工智能发展带来科研范式变革，空间科学领域也正处于迎接新型科研范式的关键阶段。在开放科学目标驱动下，随着源代码、科学信息、科学数据、科研基础设施等相关资源和能力的开放步伐，能有效作用于新范式科学研究，加速人工智能技术和学科领域知识和数据的深度融合，领域开放科学的发展将极大促进科研新范式的发展。而随着新范式的发展，对科学研究的透明性、包容性、可复用性和创新效率也提出了更高的要求，将进一步反哺开放科学的发展步伐。

纵观整个开放科学发展历程，在当前这个科研范式变革新时期，对互联互通的开放研究基础设施的紧迫需求是最显著的特征之一。李国杰[31]提出，平台型科研是新型科研范式的重要特征，科研工作越来越离不开高质量的数据、先进的算法模型和强大的计算能力。新型科研范式要求数据、模型、算力互联贯通，融合利用开放访问的科学数据、知识库、科学模型与工具软件，并且同时支持人类和机器科学家驱动的科研创新活动。这样的科研活动模式不是孤立的单个平台设施足以支撑，急需发展互联互通的开放研究基础设施。

4.4 对空间科学领域科学数据中心的发展启示

全球空间科学领域开放科学行动以及新型科研范式下的开放科学发展特点，对于我国空

间科学领域科学数据中心具有重要启示作用。科学数据中心作为开放科学的重要实施主体，有望在新时期为空间科学领域创新发展发挥更积极的作用。

1）我国科学数据中心前期的开放科学实践主要侧重于推动领域科学数据开放共享与出版，在领域专用模型软件开源开放和开放研究基础设施能力水平方面还处于跟跑阶段，与国际先进水平存在差距。应学习空间科学领域国际领军数据中心的全局性视野，从政策、资源、设施、生态等全方位推进开放科学行动，为领域开放创新活动提供更全面的支持。

2）行动过程中，应积极拥抱科学数据治理与开放的新理念、新技术，如（元）数据语义互操作、关联数据发布、数据溯源与可信认证、效益追踪与评价等，致力提升空间科学数据的 FAIR 化水平，从技术层面打通屏障，消灭壁垒，促进有序开放利用。

3）面向新型科研范式带来的挑战与需求，科学数据中心在整个开放创新链条中将不止承担传统的数据管理与发布职能，发展研究型科学数据中心是新的趋势。未来的科学数据中心与科研创新团队之间的界限将愈加模糊，科学数据中心也将紧密参与科学发现环节的创新工作，通过与科研社区的紧密合作，共同发展适应新范式研究的 AI-ready 数据库、领域专用 AI 模型和数据分析应用工具，承担学科领域、人工智能、大数据和信息技术领域交叉创新的桥梁，联合打造互联互通的领域开放研究基础设施，形成跨机构、跨领域协同创新的新型科研组织模式。

5. 总结

开放科学对现代科学发展具有积极作用，响应全球开放科学发展的蓬勃态势，空间科学领域也正积极推动相关开放科学行动。本文对近年来全球空间科学领域的开放科学发展现状进行了综合调查研究，特别是跟踪剖析了美、加、欧等主要空间强国政府机构主导的开放科学行动，以及由学术出版界和空间科学领域科研共同体发起的开放科学行动，对本领域开放科学发展现状形成了整体认识，并以国家空间科学数据中心为例介绍了我国空间科学领域的开放科学具体实践案例。通过对调研结果的分析以及对当前面临的问题挑战的思考，本文提出需制定领域开放科学发展路线图，并积极拥抱领域科研范式变革的新机遇，以建设领域开放研究基础设施为抓手，推进新时期空间科学领域开放科学发展。同时，本文针对科学数据中心这一开放科学行动的重要主体，提出了对标国际先进水平全面推进开放科学行动，发展新理念、新技术以推进 FAIR 化开放利用，向研究型数据中心转型以发挥科研创新活动纽带作用等三项未来发展建议。

本文是领域开放科学的综合性调查研究，侧重于以全局视野概览全球空间科学领域开放科学行动发展现状，并开展较为宏观和初步的分析思考。后续将聚焦其中若干关键问题开展深入研究，包括将我国空间科学领域开放科学行动与世界空间强国进行对标分析，提供具体差距；以联合国开放科学监测框架为基础，结合空间科学领域特点提出定性与定量相结合的评估方法，针对近期开展的开放科学行动对领域科技创新和重大需求发挥的实际作用进行评估；探索解决领域数据语义互操作与协同服务网络关键技术，研发建设空间科学领域开放数据基础设施，支撑新范式下的空间科学研究与技术创新活动。希望通过相关系列研究，为开

最新录用

放科学助力下的我国空间科学领域开放协同创新提供理论支撑与新技术能力支持。

参考文献

[1] YANG Wei, LIU Xiwen, HUANG Jinxia, *et al*. Building roadmap for open science action: seizing global development opportunities[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, **38**(6): 783-794 (杨卫, 刘细文, 黄金霞, 等. 构筑开放科学行动路线图 把握开放科学发展机遇[J]. 中国科学院院刊, 2023, **38**(6): 783-794)

[2] BURGELMAN J C, PASCU C, SZKUTA K, *et al*. Open science, open data, and open scholarship: European policies to make science fit for the twenty-first century[J]. *Frontiers in Big Data*, 2019, **2**: 43. DOI: 10.3389/fdata.2019.00043

[3] UNESCO. UNESCO Recommendation on Open Science[EB/OL]. [2024-01-22]. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379949.locale=en

[4] ZHAO Kunhua, LIU Xiwen, LONG Yixuan, *et al*. From open access to open science: notion and practices of national science & techonology funding agencies[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation Of China*, 2021, **35**(5): 844-854. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2021.05.019 (赵昆华, 刘细文, 龙艺璇, 等. 从开放获取到开放科学: 科研资助机构的理念与实践[J]. 中国科学基金, 2021, **35**(5): 844-854. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2021.05.019)

[5] Office of Science and Technology Policy. OSTP Issues Guidance to Make Federally Funded Research Freely Available Without Delay[EB/OL]. [2024-01-22]. https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/08/25/ostp-issues-guidance-to-make-federally-funded-research-freely-available-without-delay/

[6] European Union. Research and Innovation Strategy 2020-2024[EB/OL]. [2024-1-22]. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-2020-2024_en

[7] NEMER M. Roadmap for Open Science (Canada)[EB/OL]. [2024-01-22]. https://digitalcommons.unl.edu/scholcom/149/

[8] Open Science library. Second French Plan for Open Science[EB/OL]. [2024-01-22]. https://www.ouvrirlascience.fr/second-national-plan-for-open-science/

[9] ZHANG Zhixiong, ZHANG Mengting, LIN Xin, *et al*. Developing trend of global scientific journals in open science environment[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, **38**(6): 795-805. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230119002 (张智雄, 张梦婷, 林歆, 等. 开放科学环境下全球科技期刊的发展态势[J]. 中国科学院院刊, 2023, **38**(6): 795-805. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230119002)

[11] HUANG Jinxia, WANG Xuan, YANG Heng, *et al*. Summary of the 10th China OA week: voices from some stakeholders on the construction of China's open scientific innovation ecology[J]. *Journal of Library and Information Science in Agriculture*, 2022, **34**(1): 49-61 (黄金霞, 汪煊, 杨恒, 等. 来自多方的声音: 构建中国开放科学创新生态——第十届中国开放获取推介周(China OA Week)会议综述[J]. 农业图书情报学报, 2022, **34**(1): 49-61)

[12] WU Ji. Space Science Introduction[M]. Beijing: Science Press, 2020 (吴季. 空间科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2020)

[13] GENTEMANN C. Why NASA and federal agencies are declaring this the year of open science[J]. *Nature*, 2023, 613: 217

[14] NASA. Open-Source Science Initiative[EB/OL]. [2024-01-22]. https://science.nasa.gov/open-science-overview

[15] Strategic Data Management Working Group, NASA Science Mission Directorate. Science Mission Directorate's Strategy for Data Management and Computing for Groundbreaking Science 2019–2024. NASA.[EB/OL]. [2024-01-22]. https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/05/SDMWGStrategy_Final-1.pdf

[16] NASA Science Mission Directorate. Scientific Information Policy for the Science Mission Directorate (SPD-41a). [EB/OL]. (2022-09-26) [2024-01-22]. https://smd-cms.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/08/smd-information-policy-spd-41a.pdf

[17] CSA. 2021-2024 Open Science Action Plan[EB/OL]. [2024-01-22]. https://www.asc-csa.gc.ca/eng/publications/open-science-action-plan-2021-2024.asp

[18] JACOBSEN A, DE MIRANDA AZEVEDO R, JUTY N, *et al*. FAIR principles: interpretations and implementation considerations[J]. *Data Intelligence*, 2020, **2**(1/2): 10-29

[19] ESA. Esa Affirms Open Access Policy for Images, Videos and Data[EB/OL]. [2024-01-22]. https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ESA_affirms_Open_Access_policy_for_images_videos_and_data

[20] FERRARI T, SCARDACI D, ANDREOZZI S. The open science commons for the European research area[M]//MATHIEU P P, AUBRECHT C. Earth Observation Open Science And Innovation. Cham: Springer, 2018: 43-67

最新录用

[21] HUYNH F, CHALJUB E, QUIMBERT E, *et al*. Data Terra, the French research e-infrastructure for Earth system and environment[C]//Proceedings of the XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. Berlin: IUGG, 2023

[22] Clark, M. P., Luce, C. H., AghaKouchak, A., et al. (2021). Open science: Open data, open models, …and open publications? [J]. Water Resources Research, 57, e2020WR029480. https://doi.org/10.1029/2020WR029480[23] Coalition for Publishing Data in the Earth and Space Sciences. Commitment Statement in the Earth, Space, and Environmental Sciences[EB/OL]. [2024-01-22]. https://copdess.org/enabling-fair-data-project/commitment-statement-in-the-earth-space-and-environmental-sciences/

[24] AGU. Position Statement on Data[EB/OL]. [2024-01-22]. https://www.agu.org/Share-and-Advocate/Share/Policymakers/Position-Statements/Position_Data?m-search-result=open%20science

[25] AGU. AGU Publications Policies[EB/OL]. [2024-01-22]. https://www.agu.org/publish-with-agu/publish/agu-publications-policies

[26] Springer Nature. Research Data Policy[EB/OL]. [2024-01-22]. https://www.springernature.com/gp/authors/research-data-policy.

[27] 1. Runsheng C, Zhou Y, Lulu J, et al. The State of Open Data 2023[EB/OL]. [2024-01-22]. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24638301.v1 (陈润生，周园春，姜璐璐，等. 中国开放数据白皮书 2023[EB/OL]. [2024-01-22]. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24638301.v1)

[28] Elsevier. Elsevier's Research Data Policy[EB/OL]. [2024-01-22]. https://www.elsevier.cn/about/policies-and-standards/research-data/

[29] Springer Nature. The State of Open Data 2023[EB/OL]. [2024-01-22]. https://www.springernature.com/cn/researchers/campaigns/state-of-open-data

[30] GUO Huadong, CHEN Hesheng, YAN Dongmei, *et al*. Strengthening open data infrastructure and promoting open science[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, **38**(6): 806-817. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230208001 (郭华东，陈和生，闫冬梅，等. 加强开放数据基础设施建设，推动开放科学发展[J]. 中国科学院院刊，2023，**38**(6)：806-817. DOI：10.16418/j.issn.1000-3045.20230208001)

[31] LI Guojie. AI4R: the fifth scientific research paradigm[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, **39**(1): 1-9 (李国杰. 智能化科研(AI4R)：第五科研范式[J]. 中国科学院院刊，2024，**39**(1)：1-9)

第一作者：许琦，女，1990 年 9 月出生，中国科学院国家空间科学中心高级工程师，主要研究方向空间科学数据管理、开放科学、科学数据治理。



通讯作者：胡晓彦，女，1987 年 5 月出生，中国科学院国家空间科学中心正高级工程师，主要研究方向空间科学大数据管理与智能应用、科学数据治理与大数据应用。



最新录用