用科学问题锚定发展方向——ESA最新地球观测科学战略制定过程的启示

张伊 周圻 张帆 贾朋群

欧洲航天局（ESA）最新地球观测（EO）科学战略制定过程中的很多具体做法，特别是将22个候选科学问题（CSQ）从直白的科学问题或愿景一步步分解，并与当前和未来EO能力建立起联系的过程，可以引导相关学者对未来EO发展方向的深思，一些新想法呼之欲出，这或许就是科学战略的最大价值所在。反过来，一项未来计划的评估，也可以用战略相关的更多CSQ进行维度分析，并用最新EO卫星和载荷仪器数据库进行量化，从而获得对未来计划的量化评估结果。科学战略最务实的功能，ESA将要推出的最新科学战略无疑可以作为一个范例。

中图分类号：P4　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3969/j.issn.2095-1973.2024.04.001

2024年5月29日，欧洲航天局（ESA）与日本宇航局（JAXA）合作研发的“地球云、气溶胶和辐射探测卫星”（EarthCARE）搭载云剖面雷达等载荷被顺利送入预定轨道。6月27日，进入轨道不到1个月的EarthCARE传回了第一张图像（图1），为重新认识地球系统中最为不确定的云、气溶胶和辐射机制带来新机会，或许标志着一次具有深远影响的卫星遥感探测重大创新。

EarthCARE及其所代表的“地球探索者”（EE）地球观测（EO）系列卫星成为全球EO最前沿技术的代表。每次EE卫星计划确定后，经过大约10年的研发周期，卫星升空总能带来惊喜。这背后体现了ESA在EO科学战略方面的深刻考量。

2024年5月，ESA召开了EO科学战略评估学术会

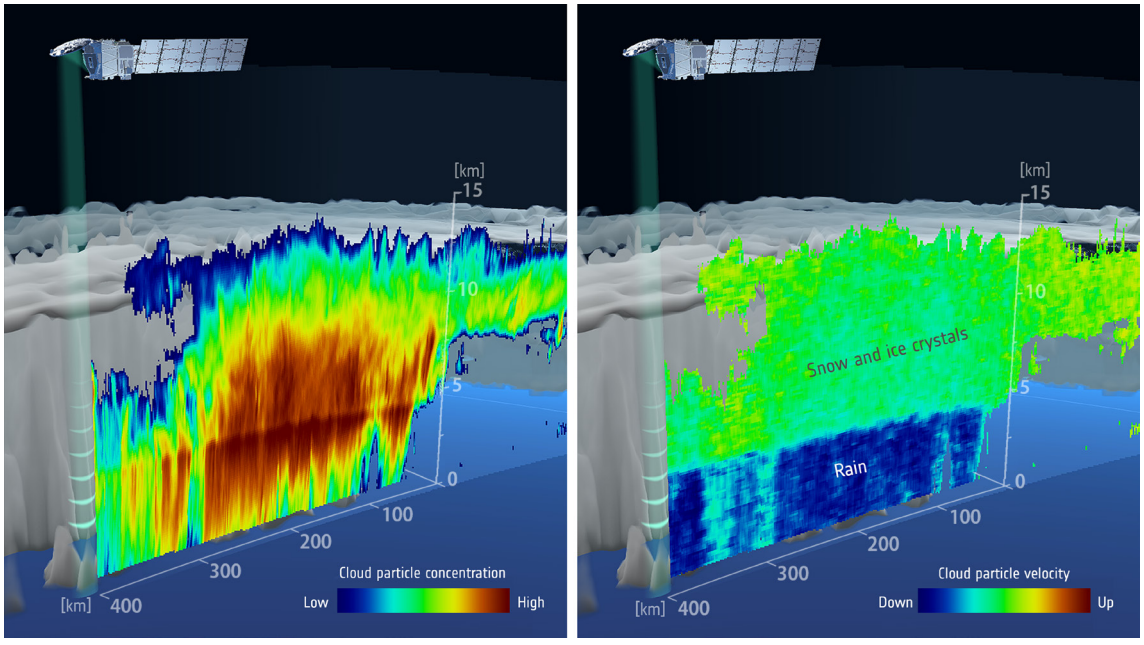


图1 EarthCARE获得的第一张云廓线雷达图像（来源：ESA，2024a）

资助信息：国家自然科学基金（42342025）

议（EO Science Strategy Review Workshop 2024，简称EO战略会）。此次会议在2023年5月发布的面向2040年的最新EO科学战略公开讨论版基础上，综合各方意见与建议，对新战略的正式发布进行最终论证和准备。

本文聚焦ESA EO战略发展和研究的相关活动，参考一些专业会议上的讨论情况，如气象卫星协调组织（CGMS）第52届大会（2024年6月）、地球观测卫星委员会（CEOS）第37届大会（2023年11月）、世界气象组织（WMO）召开的多次相关会议以及相关双边会（例如2024年3月25日召开的中国气象局和欧洲气象卫星组织高层交流会等），结合ESA和相关机构作者对ESA战略活动的介绍和文献资料，探讨ESA最新战略的发展思路和实施路线。

1 近年来欧洲天基地球观测的发展态势

历史上，欧洲开启并成就了全球工业的现代化，是世界上科技发展最成熟的区域之一，但在天基气象遥感监测以及更为广泛的地球观测领域却稍显落后。近年来，借助国家集团的发展机制，欧洲在这一领域奋起直追，取得了一些引人瞩目的成就，正在塑造更加辉煌的未来（图2）。

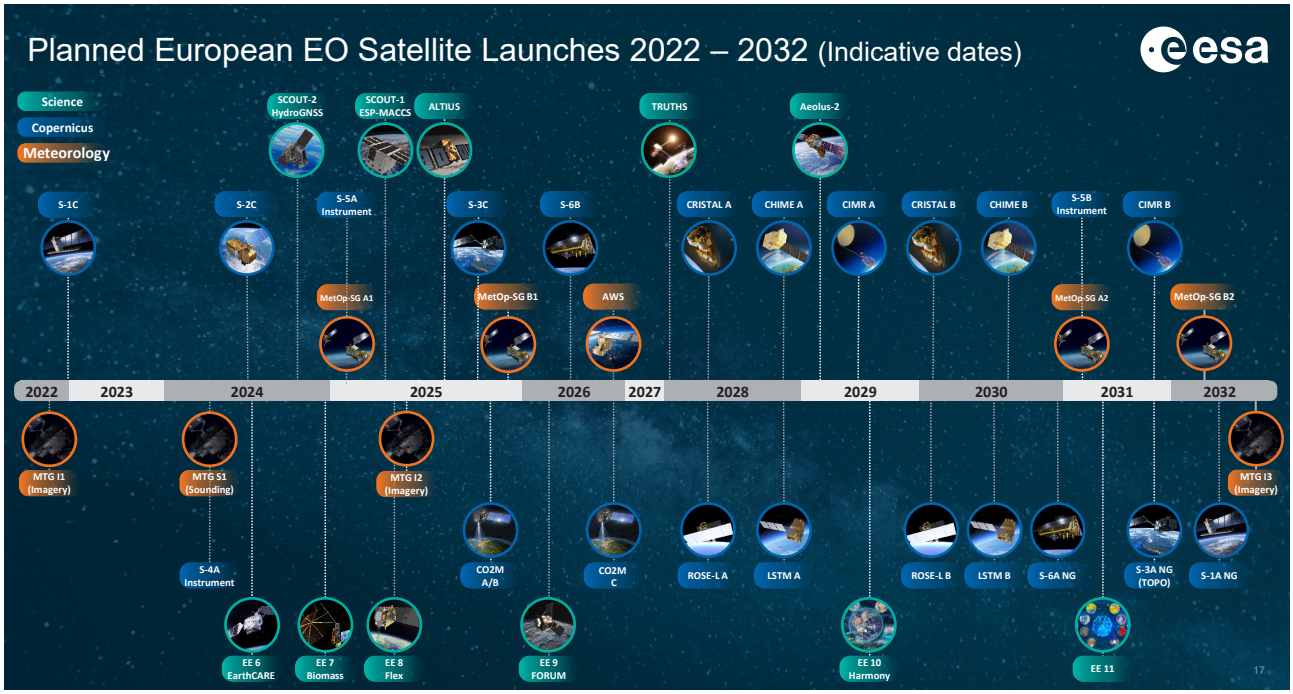


图2 2022—2032年欧洲地球观测卫星发射计划（来源：English，2024）

由欧洲22个国家合作建立的欧洲航天局（ESA）是其中最重要的贡献机构。ESA不仅与欧盟共同发展了著名的哥白尼空间项目，还通过与另外两个欧洲国家间机构——欧洲气象卫星组织（EUMETSAT）和欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的密切合作，成为欧洲EO发展的中坚力量。

1.1 ESA和EUMETSAT共同肩负欧洲业务气象卫星和EO布局

ESA是欧洲乃至全球最活跃的几个航天中心之一，EO是ESA的主攻方向之一。自ESA成立以来，已经形成了科学、哥白尼项目和气象业务3个维度的系列卫星（图3）。目前，三类计划总计79个项目：完成4项、业务化运行中14项、开发中42项、准备19项。这样的成绩单对于ESA来说，不仅结构合理，而且让欧洲成为全球EO的领导者之一。例如，哥白尼项目的哨兵系列卫星提供目前世界上最多的EO产品：每5 d以10 m分辨率扫描全球陆地一次；日产品包括陆地、大气、海洋、气候、灾害和安全等领域，数据量达25 TB，发布量300 T；全球注册用户数量超过65万。

ESA的EE项目是世界上最为成功的EO系列卫星之一（图4）。EE项目于2009年启动，意在通过科研卫星的研发，探索开发新的EO观测能力，覆盖大气圈层以及生物、水、冰冻等圈层和固体地球，尤其关注不同圈层交界处的相互作用，以及人类活动与地球自然过程的交互。EE项目还通过设立“核心”和“机会”两类项目，分别强调原始创新性和低投入但取得高效益的探索。全球“现象级”的EE核心项目“风神”（Aeolus），因为运行期间提供了全球风场等空白数据，不仅创造了科研卫星运行期间数据被主要数值天气预

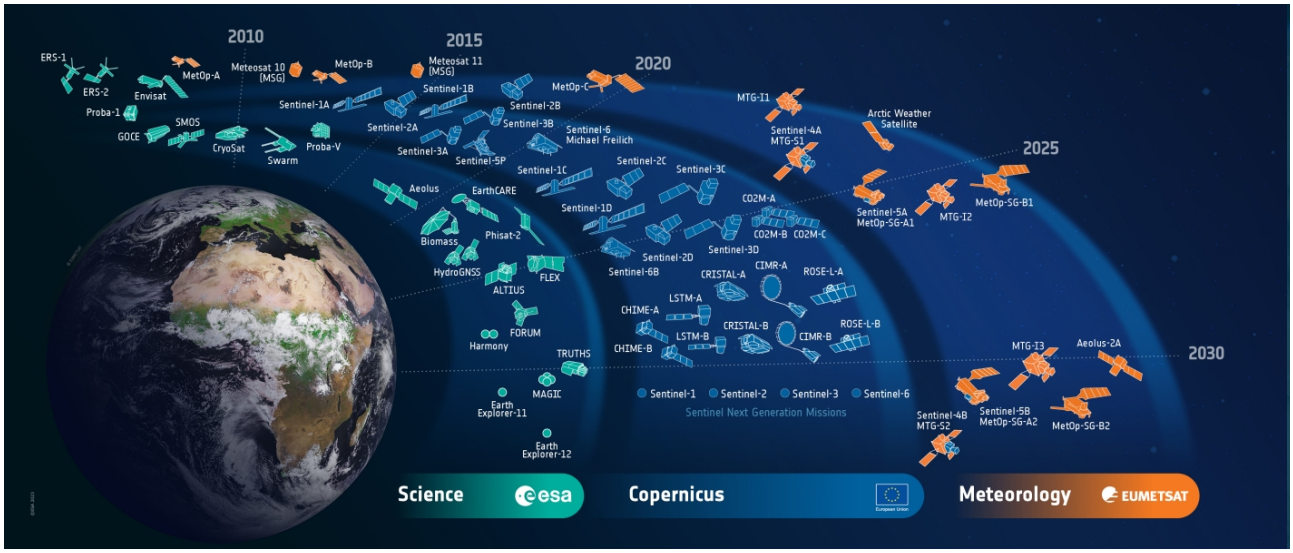


图3 ESA科学、哥白尼项目和气象业务3个系列卫星到21世纪30年代的发展布局（来源：Greening，2024）

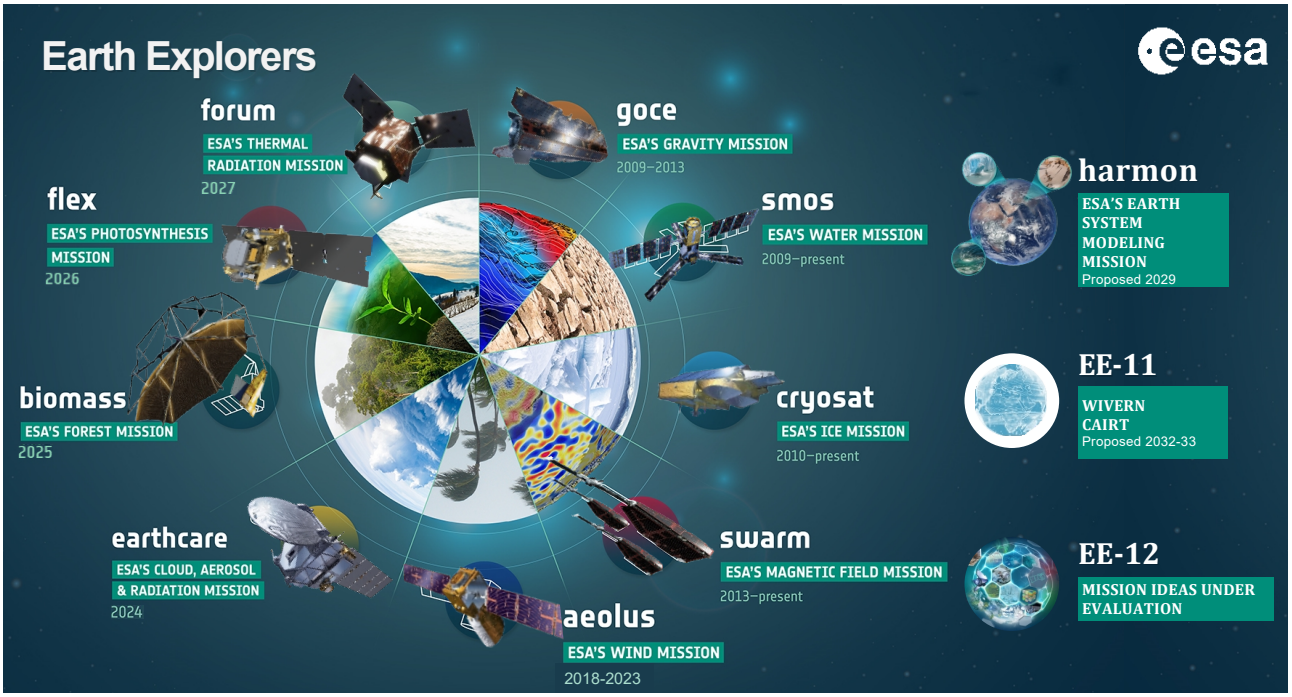


图4 ESA的EE系列卫星（来源：Greening，2024）

报（NWP）中心纳入业务数据同化系统的高光表现，也带动了“风神”下一代瞄准业务应用卫星的研发。

EE项目的前5项（EE-1～EE-5）已经实施或完成，EE-6（EarthCARE项目）～EE-10在运行或研发中，而EE-11进入二选一阶段（候选项目为变化大气红外断层扫描（Cairt）和风速雷达（Wivern））。EE-12启动后，2024年4月，17个应征设计想法中的4个项目脱颖而出，分别为填补冰雪圈观测空白的CryoRad项目、测量太阳辐射的ECO项目、地球静止轨道雷达研发的Hydroterra+项目和测量50～150 km原子氧的Keystone项目，这些项目进入为期18个月的评估研究阶段。

哥白尼项目从最初的一个可操作的环境监测想法，已经走过25年的历程。该项目最引人注目的是哨兵系列卫星，目前包含7个类别的哨兵卫星，已经成为全球最全面的卫星监测和应用平台之一。鉴于良好的声誉，哨兵卫星的扩展任务也在2020年前进入研发阶段（图5）。这些项目分别涉及实现人为CO_2排放（CO2M）、极地冰雪（CRISTAL）、海表（CIMR）、陆地（LST）、粮食生产（CHIME）和植被及地面湿度（ROSE-L）等的监测。

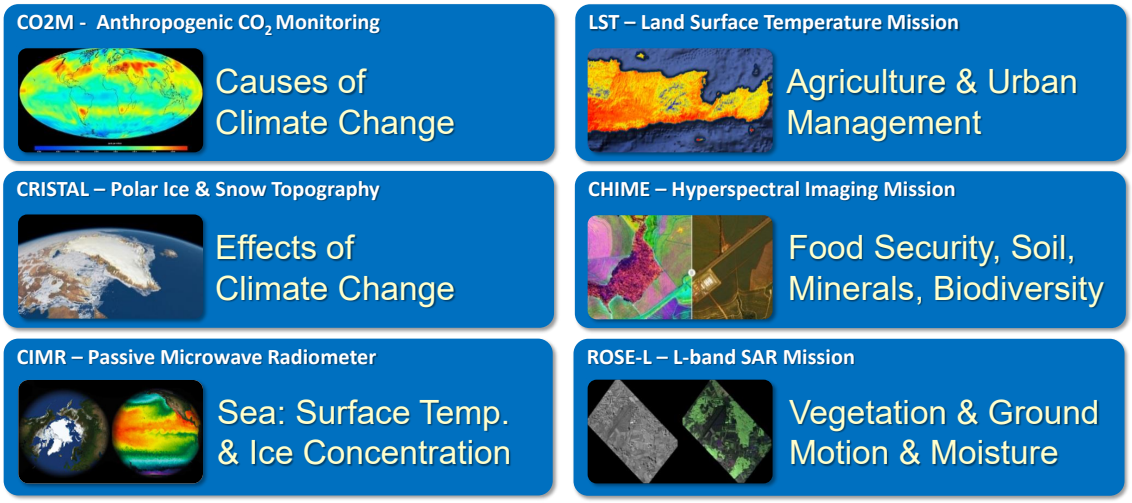


图5 欧洲哥白尼项目哨兵系列卫星的扩展项目（来源：English，2024）

在业务气象卫星方面，ESA和EUMETSAT合作，目前拥有4颗地球静止轨道卫星和6颗低地球轨道卫星（图6）。其中与气象业务关系最为密切的第三代静止气象卫星中的第一颗卫星MTG-I1于2022年12月成功发射，2023年5月4日发布首图。该卫星搭载的闪电成像仪还使欧洲具备了天基闪电观测能力。下一颗卫星MTG-S1计划于2025年第三季度发射。MTG卫星较上一代卫星，时间分辨率从15 min提升到10 min，空间分辨率从3 km提高到了1 km，频谱通道数量也从12个增加到16个。

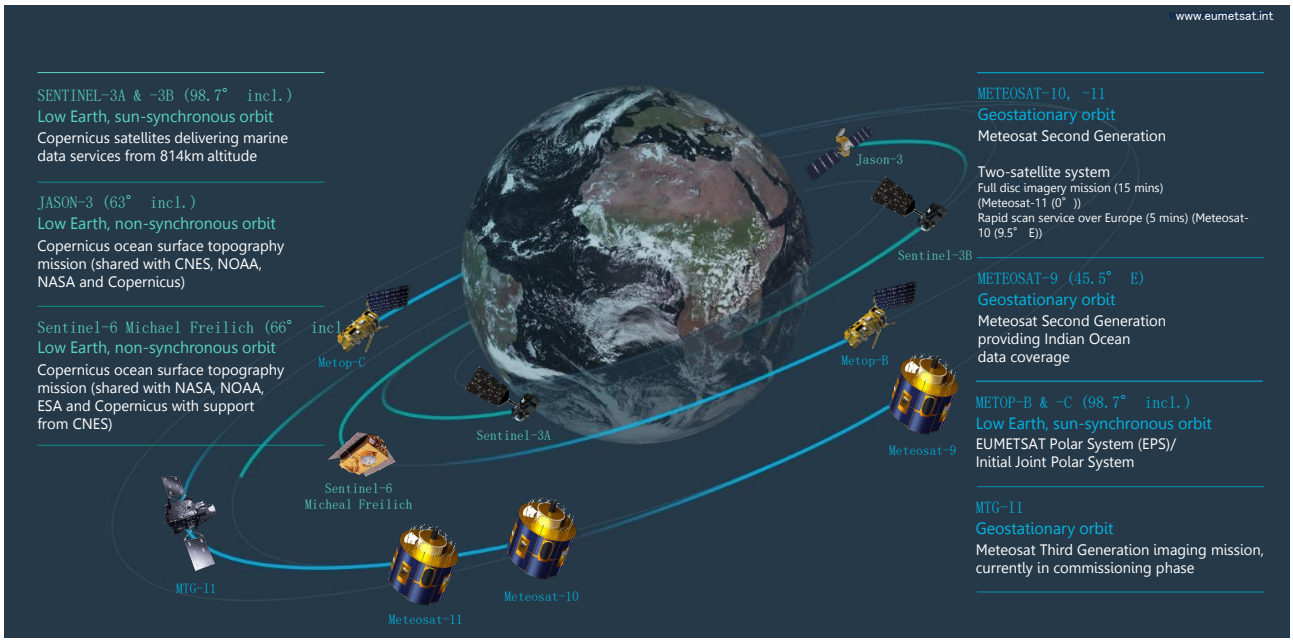


图6 欧洲气象卫星布局（来源：Evans，2024a）

1.2 ESA的EO科学战略在欧洲和全球的重要性

早在20世纪90年代，主要在为跨欧洲运输网络提供卫星无线电导航需求的推动下，欧盟开始发展空间技术，目前的3个旗帜项目为1999年开始实施的民用导航伽利略项目，2009年开始的欧洲地球同步导航覆盖服务（EGNOS），为环境、农业、气候、安全、海事监测等领域提供准确和可靠的地球观测信息的哥白尼项目。从这些空间项目方案开始到2020年，欧盟总投入达180亿欧元，其中伽利略和EGNOS项目完全由欧盟资助，哥白尼项目资金约2/3由欧盟提供，其余资金来自ESA。

2024年，欧盟推出首个针对EO的战略研究和创新议程（SRIA）。该议程概述了2025—2027年及以后欧洲EO的工作计划和关键优先领域，其中，哥白尼项

目是欧盟空间计划的重要组成部分，而ESA是包括哥白尼项目在内的主要研发和服务机构。

ESA的前身作为一个欧洲国家联盟和“纯粹科学”的空间组织，在20世纪60年代起步。1973年，欧洲部长会议决定成立ESA。ESA于1975年由10个创始国宣布成立。成立之初，ESA就将EO作为主要发展领域。正是凭借在EO领域的持续创新，ESA各类EO产品已经成为欧洲和全球相关政策框架中最重要的决策依据和数据支撑来源（图7）。

欧洲学者比较了2000年和2020年ECMWF预报业务中利用的卫星数据：所利用的卫星数量从约10颗增加到约50颗；星载仪器从12个增加到95个；每天获得

图7 ESA EO活动支持全球和欧洲政策框架（来源：Ottavianelli et al., 2024）

的卫星数据量提升了114倍。在这些卫星数据来源中，来自美国的数据从占比70%减少到了30%；而欧洲和亚洲卫星数据占比则分别从20%和10%，快速增加到了45%和25%。到2024年，全球约有200颗卫星支持天气、气候、地球系统和空间天气监测，另有约100颗其他相关EO卫星。在这样的格局中，ESA作为引领欧洲天基观测的最重要机构，不仅在全球占据了重要位置，也让全球气象及相关领域卫星的布局走向平衡和合理。

在EO结合AI技术推进地球系统研究和应用方面，欧洲已经占据全球领先地位。作为欧洲最重要的观测“引擎”机构和数字孪生地球项目的深度参与机构，ESA在最新描绘的未来发展蓝图中已经抢占先机。在ESA描绘的未来中，瞄准数字孪生地球这一终极技术和应用，融合了量子计算、通用人工智能（AGI）等大量先进的技术和理念（图8）。

2 ESA最新EO科学战略制定的关键过程：提炼候选科学问题

ESA计划在2024年发布最新EO科学战略的最终版本。回望这份即将出炉的战略的制定过程，ESA采取分两步走的技术路线：首先启动科学战略基础研究项目，项目的成果就是凝练一套全面的地球科学问题，作为战略的候选科学问题（CSQ）；之后围绕CSQ进行深入研讨，完成战略文本。

2.1 1998年以来ESA四次制定EO科学战略

ESA最早于1998年发布第一份战略文件《ESA的活力星球计划的科学和研究要素》，随后分别在2006年和2015年发表《变化中的地球：ESA活力星球计划面临的新的科学挑战》和《ESA地球观测科学战略：科学进步和社会惠益的新时代》（简称“新时代”）。“新时代”战略于2015年公布以来，EO科学和技术发展迅猛，战略更新迫在眉睫。2023年7月，最新EO科学战略公开评论版《未来世界的地球科学行动》面世，标志着ESA系列战略文件更新完成了第一步（图9）。

ESA认为，EO科学战略在很多方面具有重要意义：1）ESA所有EO任务公开征集和选择，需要以战略为指导；2）决策过程中的项目，需要回应科学战略中提出的科学问题和优先事项；3）战略还是一个国际合

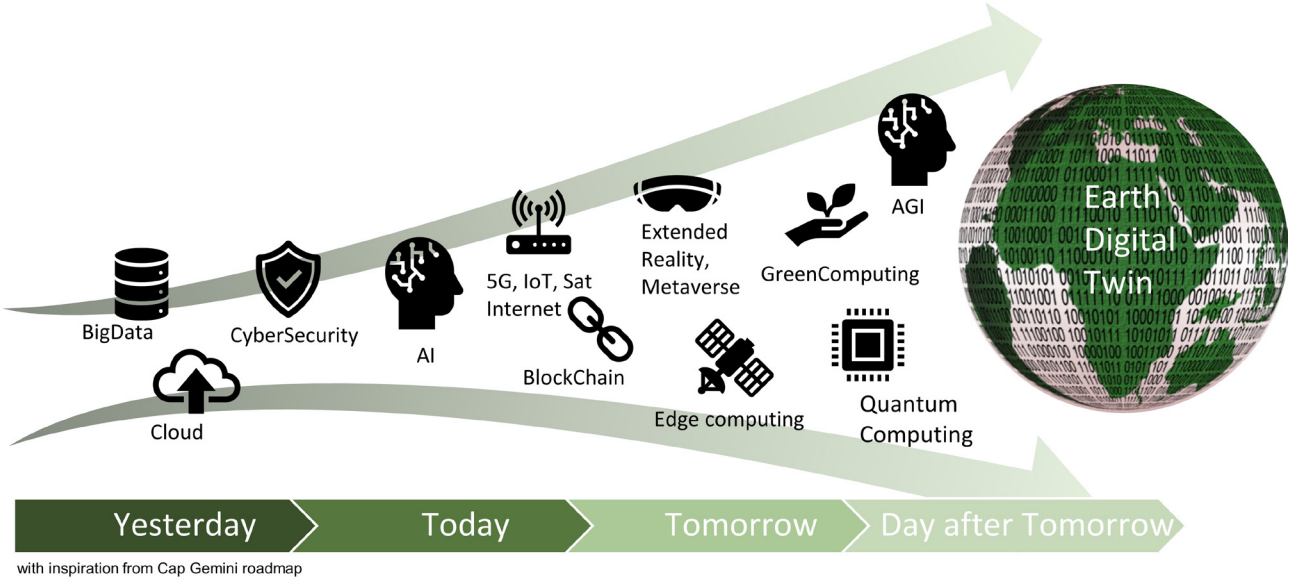


图8 ESA描绘的EO与先进模拟技术融合之路（来源：Drinkwater et al., 2024）

图9 1998年以来ESA的EO科学版本（来源：Drinkwater et al., 2024）

作的框架；4）科学战略确定新的EO任务，在开发新技术和观测传感器/平台能力所需投资优先顺序中起到指导作用；5）战略还是投资和确定优先研发活动的主要依据；6）科学战略还是ESA项目制定开发愿景、目标和志向的工具，并能对项目的细节给予指导。

2.2 2024年战略先期基础研究成果：凝练出22个科学问题

最新战略初稿的确定，主要基于由欧盟各成员国研究机构组成的团队开展的EO科学战略基础研究（EO Science Strategy Foundation Study）取得的成果。科学战略基础研究的重要任务之一，是确定、证明、记录和排名有限数量的EO候选科学问题（CSQ）作为下一代EO科学战略的潜在科学推动力。

CSQ的基本要求包括：1）在ESA项目输出和获得社会效益之间建立密切的联系；2）使用跨学科的方法来识别跨越地球系统科学领域的科学问题和知识差距，而非特定领域的挑战；3）专注于不同时间尺度，在这些尺度上按照战略采取行动（并取得成果），同时希望能够更加频繁地更新战略；4）与之前战略相比，减少挑战的数量以便采取更有针对性的行动。

为了战略性地凝练科学问题，通常在期望详尽的科学问题与管理上仅提出有限数量问题的限制之间存在紧张关系，从而导致ESA EO团队在感兴趣领域与关键科学优先事项之间难以取得平衡。面对这样的问题，对CSQ三个层面上的约束能促成平衡的实现：1）在指定领域端，需要给出清晰的行动路径（新任务、

研发、可测量的进步）；2）在管理端，太多的CSQ会稀释关注度，并可能导致战略不明确；3）在全面覆盖端，需要包括地球科学战略的宽度并与整个ESA合作。

在上述原则指导下，通过设立12个跨领域视角研究小组，征集确定了97个CSQ，又通过结构调整合并减少到57个，最后，再次从地球物理可监测视角进行凝练，得到22个CSQ，并使之与基于CEOS/OSCAR卫星数据建立的当前和近期计划的卫星及荷载能力数据库建立了联系（表1，图10）。

表1 2023年7月ESA EO科学战略草稿确定的22个CSQ

编号	科学问题	编号	科学问题
1	全球碳循环：哪些人为和自然过程驱动全球碳循环	35	侵蚀过程：我们能否量化流域的侵蚀过程及其导致的沉积物排放到海洋中的情况
2	陆地生物圈响应：陆地生物圈是如何对人类活动和气候变化做出响应的	36	地震变形过程：我们能否观测、建模和预测板块边界在地震周期中的变形过程，包括从震前到震后各阶段以及震间阶段
3	海洋碳循环：海洋碳循环是如何对人为CO_2和气候变化做出响应的	38	地壳动力学：地球地壳在与内部地质动力相互作用过程中是如何演变的，这种相互作用如何在长期内塑造地球表面
5	沿海海平面：哪些过程驱动了沿海海平面的变化	43	耦合循环：地球的能量循环、水循环和碳循环之间的主要耦合决定因素是什么
7	沿海过程调节：沿海过程如何调节陆地、大气和海洋之间的交换	44	水循环：人类活动对水循环的影响有多重要，我们能多准确地预测这些影响
8	沿海碳循环：沿海地区如何对全球碳循环做出贡献、如何应对气候变化和人类的压力	45	气候敏感度：如何在提高气候系统内部能量流动估计的同时减少气候敏感度预测的不确定性
20	冰雪圈质量平衡：冰盖、冰架和冰川质量平衡变化的主要驱动因素是什么	46	地球能量失衡：地球能量失衡和地球热量库存是如何随时间变化的，为什么会发生变化
21	海冰热力学：驱动海冰热力状态和变化的主要物理过程是什么	48	行星热交换：我们如何提高区域尺度上对行星热交换的监测和理解能力
24	极地气候关系：确定极地变化与全球气候变化之间的关系	51	岩石圈-大气层-电离层耦合：岩石圈、大气层和电离层之间的耦合机制有哪些；它们能否被充分建模和监测，以支持灾害风险管理
25	极地生态系统影响：冰冻圈如何影响极地生态系统，气候变化如何改变这些反馈	55	陆地生态系统状态：全球各地生态系统结构组成和功能的地域模式有哪些
33	固体地球变形：在当前和过去的冰载荷下，固体地球是如何变形的，这告诉了我们关于其流变学的哪些信息	56	生态系统转变

注：编号为57个CSQ顺序编号。

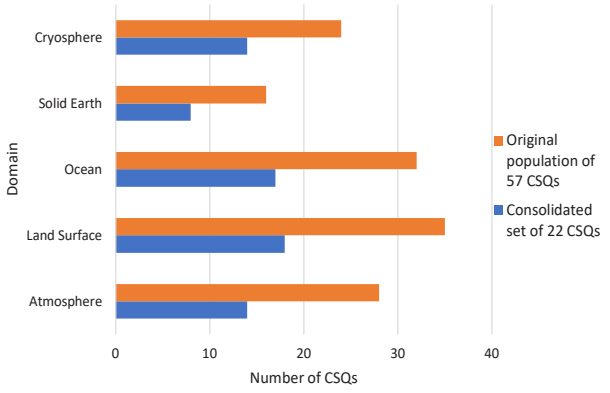


图10 按领域分布的最初57个和凝练后的22个CSQ（来源：Styles et al., 2024）

2.3 EO科学战略基础研究提炼的22个CSQ分析

表2给出了22个CSQ对地球圈层的覆盖情况。不难看出，大部分CSQ都是跨圈层的科学问题，其中除了5个问题涉及单一圈层外，分别有8、7和2个问题覆盖2、3和4个圈层。而22个CSQ涉及大气、陆地、海洋、固体地球和冰雪圈的次数，分别为11、14、12、6和7次。这全面反映了22个CSQ的跨领域视角，以及问题集整体的某种平衡。

按照技术主题进行划分，最初的57个CSQ中前2位的是采样/轨道和长期持续/监测两类，而AI/模拟代表的新技术和外场试验/原位观测也有近30个问题（图11）。

为了将CSQ涉及的卫星观测与目前气象卫星能力进行比较，研究小组基于CEOS、WMO卫星数据库和其他来源，汇总了398个卫星项目（业务运行270项，未来项目128项）以及这些项目携带的505种载荷仪器。对汇总信息的分析（图12）表明，EO覆盖占绝对优势的大气，在未来或许被弱化和综合进跨领域观测中，而更多的技术主题可能在不同圈层之间找到对应。

22个CSQ还可以在更加广泛的维度被审视（图13）。这时，科学意义和支持政策行动被叠加思考，而完成周期和空间技术可控能力被综合判断。显然，这样的基础研究结果，能够有效支撑未来战略优先领域的选择。

3 ESA EO科学战略的几点启发

ESA最新EO科学战略立足于5个相互关联的支柱之上：1）提高对地球及其变化高质量观测能力，给出其复杂过程的概要视图；2）填补地球系统认知的知识

表2 22个CSQ对地球圈层的覆盖

编号	科学问题	大气	陆地	海洋	固体地球	冰雪圈
1	全球碳循环	■	■			
2	陆地生物圈响应	■	■			
3	海洋碳循环	■		■		
5	沿海海平面		■	■		
7	沿海过程调节	■	■	■		
8	沿海碳循环		■	■		
20	冰雪圈质量平衡			■	■	■
21	海冰热力学					■
24	极地气候关系	■		■		■
25	极地生态系统影响		■	■		■
33	固体地球变形				■	■
35	侵蚀过程		■	■	■	
36	地震变形过程				■	
38	地壳动力学				■	
43	耦合循环	■	■	■		
44	水循环	■	■			
45	气候敏感度	■	■	■		■
46	地球能量失衡	■	■	■		■
48	行星热交换	■	■	■		
51	岩石圈-大气层-电离层耦合	■			■	
55	陆地生态系统状态		■			
56	生态系统转变		■			

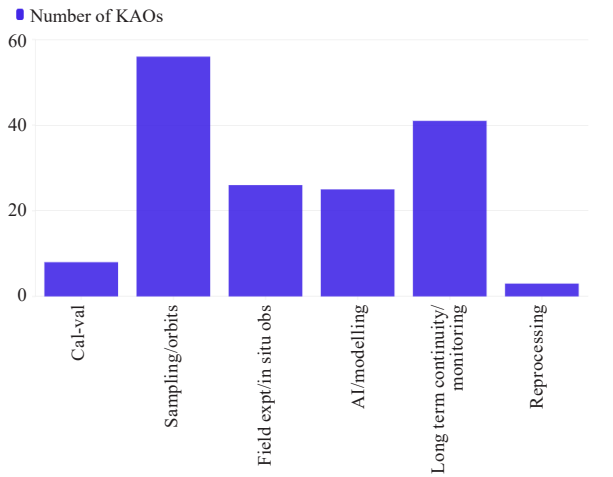


图11 最初的57个CSQ的技术主题分布
（从左到右：校正/验证、采样/轨道、外场试验/原位观测、AI/模拟、长期持续/监测、再处理；来源：Styles et al., 2024）

差距；3）发展模拟、预测能力并满足社会需求；4）将知识、数据和能力转化为社会效益和知情决策；5）确保有效的科学方法在最新科学进步和下一代观测系统之间持续融合。

ESA目前计划在2024年中期完成瞄准2040年的EO科学新战略，为2025年推出《ESA战略2040》打下基础。2024年5月的研讨会内容，可以展望这份新科学战略和欧洲天基EO的发展方向和关键特征。

3.1 新理念的渗透

2017年，武汉大学学者在一项研究中提出了地球观测大脑（EOB）的概念，提倡未来将卫星星座、通信卫星、导航卫星、航空器通过动态链接网络连接起来，形成空域信息网络，从而实现智能空域信息的实时服务（图14）。

在ESA EO科学战略研究中，EOB的概念被用来描述EO的生态系统。EO的大互联，无法脱离基准基础设施的概念，解读和融合其中的关键要素，包括相关性、标准、真实性、长期数据保存、最佳实践、通过演进不断改进、模块化和可扩展性、互补、可重用性、灵活性和相互连通等。在此基础上，就可能成功实现EO包络（EO Envelope）机制对科学进步产生重要影响。正是在这样的理念下，ESA提出了EO基准架构蓝图（EO Reference Architecture）的概念，将其作为科学战略的补充，同时也是对2040年长期EO科学战略中“活力地球观测互联”的响应，并提供了可行的战略基础。EOB观念的渗透，或许在未来引领着天基地球观测和更广泛应用范式的改变，例如，到2040年，目前EO观测中的一揽子观测任务卫星的数量将减少。

3.2 科学团队和研究团队合作分工让CSQ更具提示意义

回顾ESA最新EO科学战略制定过程，基本上是从科学问题分析得到具体的能力差距的过程。在这一过程中，一方面体现了科学团队和研究团队之间的密切合作；另一方面也实现了每个科学问题被分解为知识进步目标，并映射到地球物理观测，再通过天基观测数据库具体靶向到能力差距（图15）。在这样的过程中，科学团队发挥其专业认知的优势，将有价值的科学问题，从知识进步的角度进行细致拆分；研究团队接力，将知识进步分解到地球物理观测领域，再利用当前和未来卫星遥感观测数据库，完成天基能力差距的准确定位和描述。

表3给出3个CSQ分析的更多细节。面对这样的典型跨学科问题，战略研究的结果大多提出天基和地基观测相结合，同时观测不仅指向新传感器制造，还有目前已有卫星后继星和更精确验证系统的加速开发。

3.3 战略基础研究团队的人员结构

ESA作为全球领先的EO研发部门，支持其最新科学发展战略的基础研究团队，除了来自战略基础研究中标战略咨询机构Assimila咨询公司（4人）以及Steeple（1人）、Symbios（2人）和NERSC（3人）等战略咨询机构的10位战略专家外，在总数为25人的核心成员中，还聘任了多家机构跨学科的著名学者（表4）。两

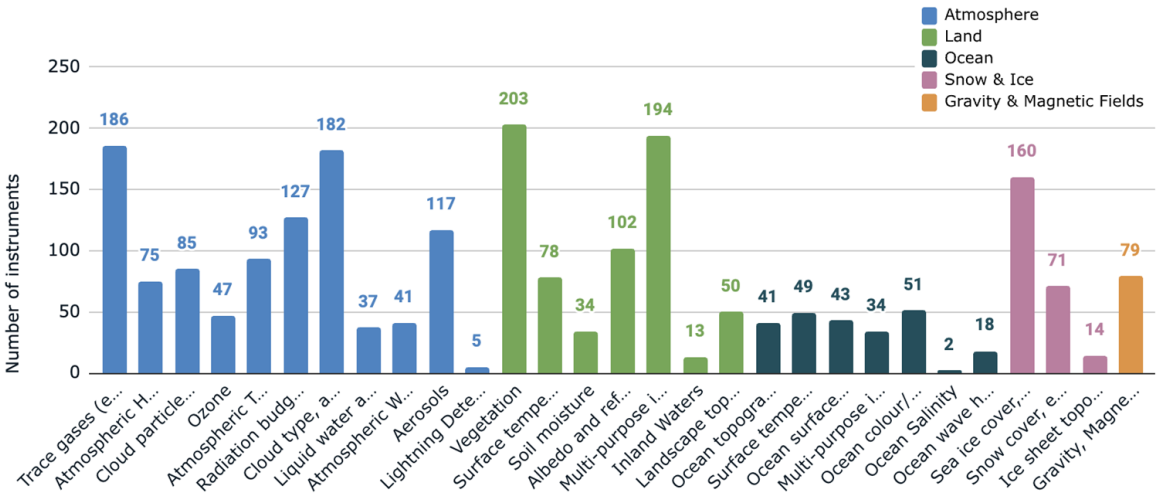


图12 当前和未来398个业务卫星及携带的505种仪器按照领域和技术主题的分布（来源：Styles et al., 2024）

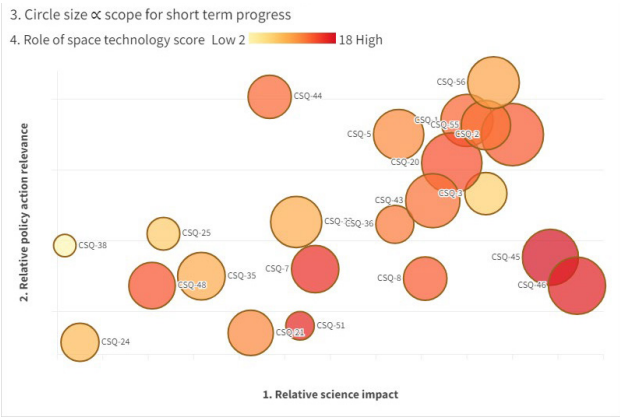


图13 用4个维度分析22个CSQ（维度：1–横坐标，科学影响；2–纵坐标，政策行动相关性；3–圆形大小，正比于短期进步；4–色标，空间技术作用得分。来源：Styles et al., 2024）

类专家密切合作，为最终凝练出22个CSQ做出了关键贡献。

这些聘任的学者中，很多具有多学科背景和高层次视角。例如，Han Dolman教授现任荷兰皇家海洋研究所所长，是陆地生物圈与水文循环、生物地球化学循环和大气之间相互作用的专家，担任全球气候观测系统（GCOS）指导委员会主席，同时是中国南京信息工程大学的名誉教授。来自Crisp Spectra科学咨询公司的首席执行官David Crisp博士，退休前是美国加州理工学院和美国航空航天局（NASA）喷气推进实验室（JPL）的顶级大气物理学家，曾担任NASA轨道碳观测卫星-2（OCO-2）和轨道碳观测卫星-3（OCO-3）任务的科学团队负责人。来自法国墨卡托国际海洋组织的物理海洋学家Karina von Schuckmann博士是哥白尼海洋报告框架的负责人，政府间气候变化专门委员会（IPCC）《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》（SROCC）、第六次评估报告（AR6）以及政府间海洋学委员会（IOC）《全球海洋科学报告》第2版的主要作者，曾参与WMO气候状况报告，也是欧洲科学院院士。来自法国国家地理与森林信息研究所的Isabelle Panet博士是固体地球、质量交换、地磁学等多个领域的专家，曾在2023年获法国科学院表彰，其研究获27.5万欧元科学大奖。

战略研究团队通过战略和学科专家密切沟通，共同面对整个科学界，征集最初的科学问题，凝练后多次咨询和召开研讨会，与学术界充分沟通，分析202条针对过渡CSQ的有效评论，以及相关的意见和建议，最终让来自科学家的智慧被22个CSQ综合表征。

4 小结和讨论

ESA和EUMETSAT是欧洲EO和气象业务卫星观测最重要的机构，两个机构得到的大量观测数据及时分享给欧洲各成员国和全球用户。在观测大数据与模拟技术的对接上，ECMWF、EUMETSAT和ESA已经形成带动欧洲EO和地球系统研究的“三套马车”，成为全球地球科学创新发展的重要力量。

4.1 从“活力星球”到“地球行动”

ESA被认为是欧洲EO领域合作最好的典范之一，这与其20世纪末开始连续推出4份科学战略以确保发展方向上的统一有关。这些战略不仅指导近30年来机构的发展，还用战略的核心概念定义了大约每10年周期的口号：从1998年和2006年的“活力星球”和“活力星球及其新挑战”，到2015年的“新时代”，再到即将推出的“地球行动”，既包含了战略雄心，更是对面临的重大科学挑战的回应和立场表征。2022年11月

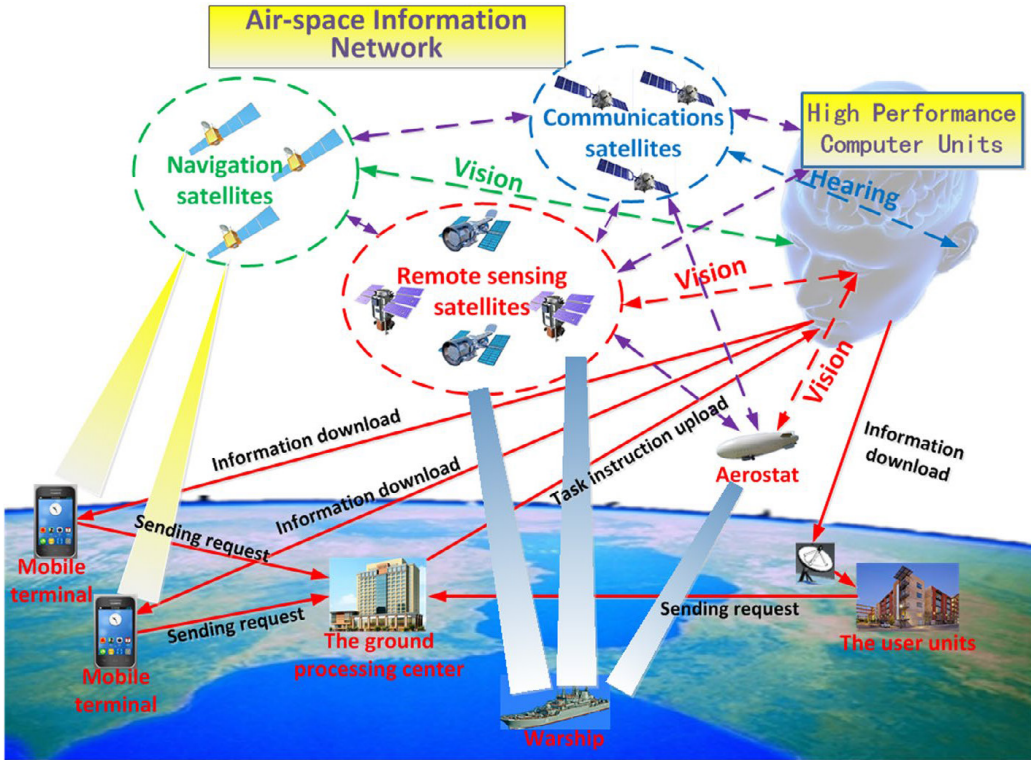


图14 地球观测大脑（EOB）概念图（来源：Li et al., 2017）

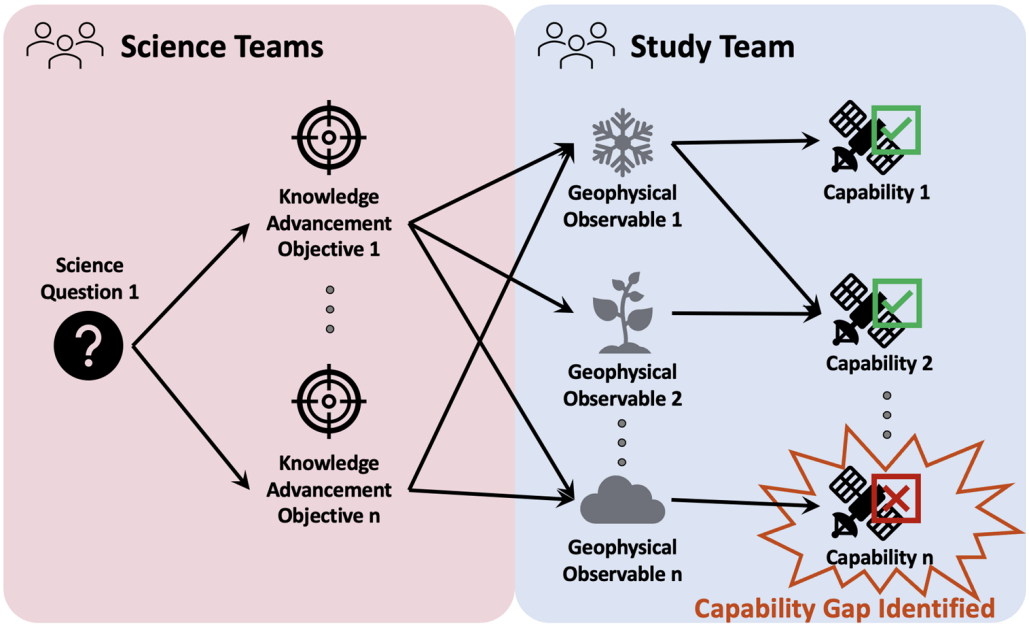


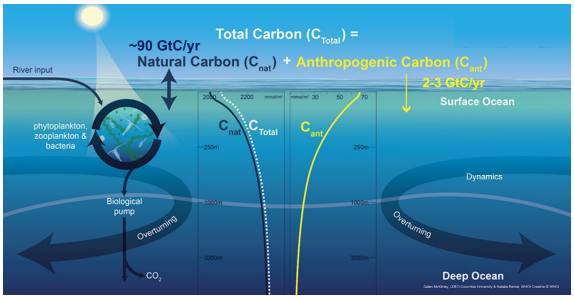
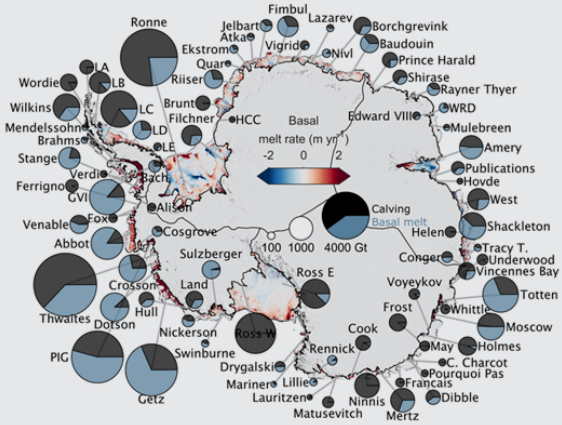
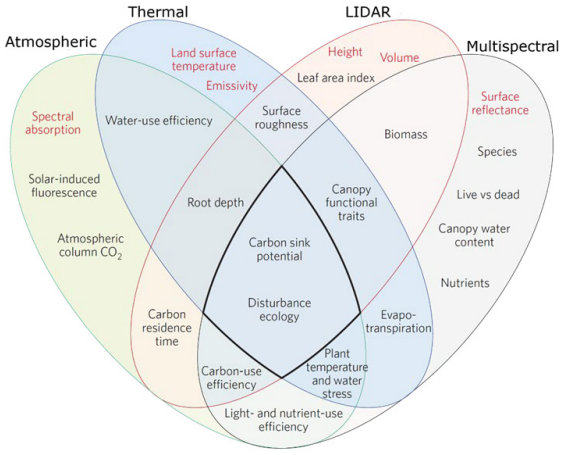
图15 科学战略制定过程中科学团队与研究团队的分工和合作（来源：Styles et al., 2024）

召开的3年一度的ESA理事会部长级会议，将ESA未来3年预算从前一个3年周期的145亿欧元提高到169亿欧元，涨幅达17%。其中在EO领域，3年将投入26.92亿欧元，继续支持EE和哥白尼项目，参与开发数字孪生地球模型等重要活动。财力支撑为今后ESA实现更有效的“地球行动”打下了基础。

4.2 委托开展战略基础研究让战略专家衔接需求和观测能力

ESA最早开始本轮次EO科学战略的讨论，可追溯到2020年末，而新战略的更新提上议事日程，则以2021年末官宣战略更新和稍早些开始的EO科学战略基础研究项目的启动为标志。历时18个月的基础研究

表3 3个CSQ个例的分析

CSQ	机制和解析能力认知	主要能力差距	前景
CSQ-3海洋碳循环	 总碳（包括自然和人为碳）循环的贡献	1）缺乏能识别和描述海洋上空偏差来源的地基验证系统；2）不具备测量弱得多但空间范围更广的海洋CO_2通量的灵敏度	天基海洋CO_2传感器不需要新技术，但需要针对这种应用优化的最新传感器设计和任务架构，还需要扩大地基和机载验证系统以确定和纠正天基观测中的系统偏差
CSQ-20冰雪圈质量平衡的主要驱动力	 1997—2021年南极冰架液/固态水总量	1）在所有的测高和SAR卫星任务中，南极高纬度地区的臭氧空洞上空都有一个观测空白；2）现场和空中验证数据集都非常稀少	1）如果Sentinel-1C不及时发射，ESA C波段合成孔径雷达数据缺口的风险很大；2）如果在CryoSat-2结束前不发射CRISTAL会失去模拟能力
CSQ-56生态系统在哪里和如何发生关键转变	 不同生态系统和生物多样性表征方法的协同作用	在很大程度上缺乏对生态系统结构和组成的一致、准确和空间详细的描述	新EO传感器与创新地面传感器结合，实现长期动态和接近真实的估计和预警

（2022年11月—2024年4月）成果，支撑了几乎所有新战略相关活动和战略本身。如此重要的研究，ESA采用委托研究的方式开展：先是于2022年2月批准了该研究，发表关于战略基础研究的声明；4月，发布委托研究邀请书；5月初，ESA召开所有潜在揭榜者参加的通气会，严格要求组建一个跨学科的国际研究团队完成基础研究工作，为这项研究框定了路线和方式。耗时一年半的基础研究凝练出来的22个跨领域优先CSQ，为新战略的制定提供了科学驱动因素。

基础研究的组织，强化了专业咨询公司战略研究方面的优势：与各方学者进行沟通的技巧和综合、凝练科学问题的能力。此外，承担机构研发的最新全球EO卫星数据库，为研究成果更加具体和面向天基观测各个技术层面打下了基础。

表4 ESA EO科学战略研究团队组成

专家	所属机构	主要研究领域
Han Dolman（主席）	荷兰皇家海洋研究所	气候
Christine Gommenginger	英国国家海洋研究中心	海岸
Ana Bastos	德国马普学会生物地球化学所	行星边界层
David Crisp	Crisp Spectra科学咨询公司	碳循环
Martin Herold	德国地球科学研究中心	生物多样性/生态系统
Alain Hauchecorne	法国大气、环境及空间观察实验室	交叉/技术问题
Jose Moreno	西班牙瓦伦西亚大学	气候临界点
Peter Thorne（组长）	爱尔兰国立梅努斯大学	气候变化观测
Karina von Schuckmann	法国墨卡托国际海洋组织	能量循环
Bob Su	荷兰特文特大学	水循环
Anna Hogg	英国利兹大学	极地
Isabelle Panet	法国国家地理与森林信息研究所	固体地球/质量交换/地磁学
Johnny Johannessen（主席）	挪威南森环境与遥感中心	卫星观测海气交互
Maria Fabrizia Buongiorno	意大利国家地球物理与火山学研究所	地震/火山和矿物
Johanna Tamminen	芬兰气象局	极端事件

4.3 候选科学问题可以从下至上直达战略层面的通道

凝练准确和务实的科学问题，一直是科学工作的第一步，也是确保研究走上正确轨道的关键。ESA制定面向2040年的发展战略时，审视这个星球，意识到比以往更多的危机：气候变化的影响已经可以真切感觉到，前所未有的天气气候极端事件频发。

对比欧洲和美国天基观测战略的制定过程，不难发现两者的异曲同工之处。20世纪末以来，美国主要EO机构，包括NASA、美国国家海洋与大气局（NOAA）和美国地质调查局（USGS）等通过委托美国科学院开展以10年为周期的天基观测需求调查和分析，为这些机构发展各自战略打下基础。美国的优势是借助美国科学院让更多的学科在调查中碰撞，而调查结果最重要的表征是投资预算，为整体上国家投入框定边界。欧洲ESA则更多通过高层咨询公司的战略智慧，对EO学者表达的问题，按照ESA制定的战略框架开展工作，对在很大程度上表达了观测需求的CSQ进行了更加准确、清晰和完整的映射，反映到对应的卫星及载荷设备。

4.4 强化科学战略的务实性并具有指南和工具属性

ESA最新EO科学战略制定中的很多具体做法，特别是将22个CSQ从直白的科学问题或愿景一步步分解，并与当前和未来EO能力建立起联系的过程，可以引导相关学者对未来EO发展方向的深思，一些新想法呼之欲出，这或许就是科学战略的最大价值所在；反过来，一项未来计划的评估，也可以用战略相关的更多CSQ进行维度分析，并用最新EO卫星和载荷仪器数据库进行量化，从而可以获得对未来计划的量化评估结果。科学战略最务实的功能，ESA将要推出的最新科学战略无疑可以作为一个范例。

4.5 如何更清晰地界定科学战略的覆盖时段仍是一个挑战

早在2015年战略制定周期中，ESA战略文件的第三方独立评估方就多次指出，ESA应该更加频繁地更新其战略，以适应新技术和新科学理念的快速发展。但是，本次战略更新依然按照大约8年周期展开，这就不免带来一些问题。例如，到距离2040年的前10年，即对2030年AI技术的发展以及对遥感数据解析、解读、处理和自动化应用等的预测都很难做到。

ESA坚持其较长周期的战略设计，其合理性也是明确的。例如，常常被形容为“野心勃勃”的EE项目，其成功案例从想法到卫星进入轨道都需要10年时间，而见到效益和成果，则在10～15年以后。刚刚升空的EarthCARE卫星，是编号为6的EE系列卫星，早在2008年5月就签订了价值2.63亿欧元的合同，当时计划2013年发射，后因各种原因，直到计划发射时间的11年后才升空，立项到入轨时间周期长达16年，如果加上该卫星想法诞生和初期哺育，时长近20年。实际情况也正是如此：一直到2030年初的EE项目已经就绪，新战略周期覆盖的卫星项目设计，按照目前的范式，发射时间最早也要等到21世纪30年代中期。

ESA新战略的制定，虽然走了一条借助于战略咨询机构开展更加公平和客观的新路，但战略对科学问题的解析，还是停留在用经典领域的划分上（图10，表2）。ESA在开发EE系列卫星时常用的划分以及用最新科技发展审视的结果，如圈层界面、业务空白、高影响观测、长期维持观测、精准或可替代传统卫星低

成本观测等更加新颖和务实的战略解析，并没有在目前科学战略征求意见稿中体现。

ESA制定2024年版EO科学战略的一个细节值得思考：该战略与2015年战略相差近10年，但两份战略的预期均指向2040年。换句话说，“新”“旧”两个战略描述的雄心勃勃的2040年愿景，并没有时效的变化，更像是一种迭代更新，为容错和调整带来机会。这或许可以理解为在EO领域，颠覆性的科学和技术创新未来将更频繁发生，展望未来的时长不宜超过20年。这不仅是战略需要更频繁更新的原因，也是对潜在创新和可能出现的更多、更大挑战应持谨慎态度的体现。

深入阅读

贾朋群, 关敏, 张萌, 2022. 欧空局EE10“和谐”卫星：如何让地球系统观测走向和谐? [J]. 气象科技进展, 12(5): 2-5.

谭娟, 樊奕茜, 贾朋群, 2022. 天基遥感观测如何改变地球科学的面貌——ESA活力星球2022年研讨会评介[J]. 气象科技进展, 12(4): 80-84.

王钊, 范鬼娜, 朱晓宇, 2023. 欧洲航天局2022年部长级会议大幅增加预算解读[J]. 国际太空(1): 27-31.

Albert F, 2024. WIGOS Vision 2040 update-implications and expectations for CGMS space agency members[R]. Washington: CGMS.

Bartalis Z, 2024. How can earth observation support energy resilience?[R]. Paris: ESA.

Borde R, Barbieux K, Carranza M, et al., 2023. Status of operational and future atmospheric wind products at EUMETSAT[R]. Montréal: International Winds Workshop.

Counet P, 2024. Update on EUMETSAT's operational commercial weather data buys[R]. Genève: WMO Fifth High-Level Session of the Open Consultative Platform.

Drinkwater M, Davidson M, 2024. Development of the draft ESA EO science strategy[R]. Frascati: ESA.

English S, 2024. Future evolution of satellite observing systems[R]. Reading: ECMWF.

ESA, 2024a. A first: EarthCARE reveals inner secrets of clouds[EB/OL]. (2024-06-27)[2024-07-29]. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/EarthCARE/A_first_EarthCARE_reveals_inner_secrets_of_clouds.

ESA, 2024b. Earth science in action for tomorrow's world: Earth Observation Science Strategy 2040[EB/OL]. [2024-07-17]. https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/3eb2014e0e7042d7a47897f110ee9293.

Evans P, 2024a. EUMETSAT programmes and plans[R]. Beijing: CMA-EUMETSAT High Level Bilateral Meeting.

Evans P, 2024b. EUMETSAT updates since CGMS-51 and report on the medium to long-term future plans on Earth observation[R]. Washington: CGMS.

Greening M, 2024. ESA updates since CGMS-51 and report on the medium to long-term future plans on Earth Observation[R]. Washington: CGMS.

Joint Research Centre (European Commission), Rixen M, Dowell M, et al., 2024. Earth observation strategic research and innovation agenda[EB/OL]. [2024-07-17]. https://data.europa.eu/doi/10.2760/18985.

Li D R, Wang M, Dong Z P, et al., 2017. Earth observation brain (EOB): an intelligent earth observation system[J]. Geo-Spatial Information Science, 20(2): 134-140.

Lonitz K, Healy S, 2024. Status on the operational assimilation of GNSS-RO data at ECMWF[R]. Reading: ROM SAF User Workshop.

Marquardt C, 2024. RO data processing—recent trends and open points[R]. Reading: ROM SAF User Workshop.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2024. Thriving on our changing planet: a midterm assessment of progress toward implementation of the decadal survey[M]. Washington: The National Academies Press.

Ottavianelli G, Koetz B, 2024. Global cooperation and partnerships for policies and development[R]. Frascati: EO Science Strategy Review Workshop.

Styles J, Briggs S, Shaw A, 2024. ESA EO science strategy foundation study[R]. Frascati: EO Science Strategy Review Workshop.

Symbios, 2024. EO science strategy foundation study: D5: links between candidate science questions, geophysical observables and EO mission capabilities[EB/OL]. [2024-07-17]. https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/f7e09c2ded1d4c17a8516b8ce2e5cc73.

（作者单位：张伊、周圻、贾朋群，中国气象局气象干部培训学院；张帆，中国气象局）

（编辑：郑秋红）