

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

■ 谭娟 樊奕茜 贾朋群

EE-11的4个项目的竞争,也开启了ESA的FutureEO计划。在这个崭新的阶段,所有成功立项的项目都需要具有一个共同的特征——本质上,是技术和科学齐头并进。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.04.015

欧洲空间局(ESA)2022年5月召开的“活力星球学术研讨会”(living planet symposium, LPS)带来一个清晰的信号:即气象和大气科学过去数百年时间里走出的主要针对地球大气层的“观测网+数值模拟”发展之路,或借助地球观测(EO)能力的快速提升,将在地球多个圈层,乃至整个地球系统语境下,加快实现地球环境中更多要素,可以像天气一样进行诊断和预报。

LPS于2022年5月23—27日在德国波恩以线下会议方式举办。这次每3年举办一次的地球科学会议,吸引了超过5000名参会者、240场科学会议和1300多个口头报告,不仅打破了ESA活动的纪录,更是在全球疫情态势依然不明的情况下,欧洲学界的一次具有唤醒意义的学术活动。会议表明,当世界来到全球应对气候危机的关键节点时,监测地球系统的变化比以往任

何时候都更加重要。EO卫星所处的太空,是监测地球环境的最佳地点,在太空能最好地感知我们居住星球的脉搏(会议的副标题),并帮助人类采取行动保护地球,使其继续充满活力。

1 活力星球会议主题领域对地球科学的新映射

LPS会前,主要依靠来自ESA和两家重要协办机构欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)专家的智慧,全面给出了会议的5个主题(表1)所涵盖的分会内容。会议的5个主题,全面阐述了我们所在的活力星球的方方面面。

LPS的5个主题内容的详尽阐述,似乎已经超出了一次学术会议对讨论内容的学术领域划分。例如,“了解地球系统”主题的一些领域细节和参考5个主题之完整技术体系,在更广泛科学意义上,是全球面临百年

表1 LPS会议的5个主题及延伸领域(关键词)

| 了解地球系统 | 推进EO任务和未来技术 | 实现地球观测数字化转型 | 赋能绿色转型 | 培育公共和私营部门伙伴关系 |
|--------------|---|--|---|--|
| 大气: 10个领域 | 校准/验证和数据质量 | AI和数据分析 | 管理风险 | 新参与者和商业EO |
| 生物多样性: 4个领域 | 地球探测使命 | 数字孪生 | 可持续发展 | 安全 |
| 生物圈: 12个领域 | EO | 新兴技术 | | 区域倡议 |
| 碳循环: 2个领域 | 遗产使命 | 无人机 | 地质灾害风险EO卫星、滑坡、废弃矿井、沿海低地沉降、地震、火山、粗分辨率回访传感器、地形运动地图技术、基于EO的危险清单、危险敏感性、相互关联系统的物理组成、老化、风化、风险移除和保险EO卫星、沿海灾害EO卫星、风应力、波浪冲刷、复杂自然灾害、弹性城市、土地退化零增长、可持续发展目标(SDG)、媒介和传播疾病(VBD)、水资源管理、能源、自然遗产、土著 | 教育 |
| 气候: 5个领域 | 气象任务 | 开放地球论坛 | | 欧洲和国际关系 |
| 地球空间: 2个领域 | 国家任务 | AI和数据分析、可信机器学习、安全性、隐私性、机密性、数据增强、超分辨率、AI4EO、训练数据、地球系统、数据同化、ML4Earth、SAR处理、无监督、元学习、数字孪生、过程表征、生态系统过程、新兴技术、无人机、高空伪卫星、EO数据立方体 | | 绿色资产、数字生态系统、生态绩效、碳信用额、环境退化、气候和生态金融行业、EO衍生信息、气候安全、环境犯罪、欧盟绿色协议地球数字模型、人口迁徙、环境危害、作物短缺、非法地下水开发、高山环境、水酸化、外来物种入侵、SAR卫星、森林和湿地测绘、雪水当量 |
| 水文和水循环: 7个领域 | 新空间任务 | | | |
| 海洋: 13个领域 | 哨兵任务 | | | |
| 极地和冰雪圈: 8个领域 | 空间技术 | | | |
| 固体地球: 2个领域 | 可追踪卫星、基准参考测量、互操作性、FLEX、分析就绪数据(ARD)、北极气象卫星 | | | |
| 小结 | 涉及EO多个平行卫星项目的设计和执行的,天基遥感数据的校准和验证,作为最重要的科学问题讨论 | 用数字孪生等技术实现EO数据数字化转型的落地系统,以更大的AI和数据处理等技术支持这样的过渡 | EO终极应用的两个领域,即风险管理和可持续发展目标。两个领域覆盖的更多圈层的物理、生物和社会要素,需前面数字化转型支撑 | EO是事关全球福祉的科学活动,广泛参与是未来人类与地球环境和平共处的前提和条件 |

资助信息: 国家自然科学基金(42142009)

未有之大变局、地球多圈层挑战层出时欧洲学者的集体回应：一方面，学界以EO为代表，在试图用更多样化、更精确和更完善的科学语言、架构来面对挑战；另一方面，当传统地学领域融入全新的地球系统科学理念时，以EO为技术抓手，5类主题及其研究、开放领域的划分，也不失为一套接近完整的面向未来地学研究发展的一套EO经纬路线图。

借助LPS会议，主办方欧空局也顺势提出了未来三年及以后雄心勃勃的计划，以增加欧洲在太空的自主权、领导力和责任感。从本次会议所展示的学术信息来看，ESA拥有大量高水平的学者，尤其是在地球不同圈层结合处，这些学者引领和提出了大量观测、模拟和应用选题，为ESA未来独树一帜的发展埋下伏笔，更为天基遥感观测重塑气象和大气科学，乃至整个地球科学学科未来5-10年的新格局提供机遇。

2 欧洲EE“9+1+4”卫星格局 最先打下完整天基多圈层监测平台的基础

ESA开发的卫星项目按照功能划分为几个类别，其中偏向于研究的地球探索者（Earth Explorers，EE）项目是本次会议最引人注目的内容之一，EE研发的“9+1+4”模式：即已经完成或确定的9项、正在决策中的1项（图1）和将要选择的4（选1）项卫星项目。

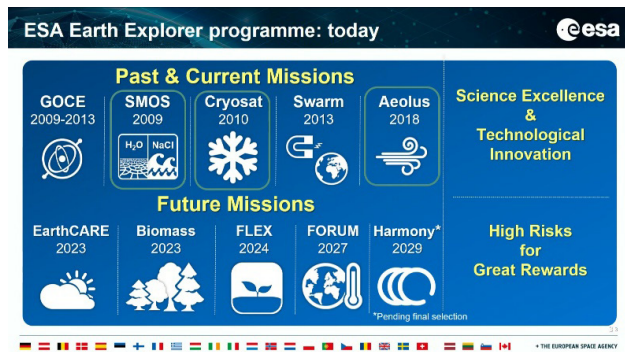


图1 ESA的地球探索者项目

自2009年第一个EE卫星成功发射以来，这些任务无一例外地超出预期。EE一般选择相对较小卫星设计，着眼于地球环境研究所需的新技术的显示。EE项目覆盖大气、生物圈、水圈、冰冻圈和地球内部，强调对不同圈层系统之间相互作用及人类活动对这些地球自然过程的影响。

EE项目又被分为“核心”项目和投入较低的“机会”项目两类，前者以科学意义为主导，后者则强调投入不多的高效益项目。核心项目的例子包括GOCE、Aeolus和EarthCare等，而SMOS、CryoSat和Swarm划为机会项目。重要的是，EE为开发业务卫星打下了良好基础。

EE-1于2013年完成，该项目以前所未有的细节绘制了地球引力的变化。目前在运行的四个项目SMOS、CryoSat、Swarm和Aeolus，提供了关于土壤湿度和海洋盐度、地球冰冻圈变化、磁场和大气环流的关键测量数据。2023年及以后发射的下一代EE项目，将利用开创性的太空技术进一步扩展人们对地球系统的知识。其中EarthCARE推进对云和气溶胶在反射和捕获地球辐射方面发挥的作用，而Biomass将测量全球森林碳，以增加关于森林在碳循环中作用的知识。FLEX任务将提供有关光合作用的信息，以阐明地球植被的功能。

2.1 EE-9：地球也是一个辐射体

为了争取在EE 9中立项，多达21个项目响应ESA于2015年发出的提交概念模型邀请，展示了丰富的地球探测不同要素的创新方案。经过评选FORUM（Far-Infrared-Outgoing-Radiation Understanding and Monitoring，远红外射出辐射理解和监测）胜出。该项目将为了了解地球的辐射收支提供新的视角，有助于提高气候变化评估的准确性并为决策者提供建议。

地球表面的温度是由大气顶部的辐射平衡驱动的，但这种平衡被温室气体的排放扰乱了，温室气体将热量困在大气中。超过一半的长波能量是在远红外电磁波，未能被测量到。为了填补这一空白，FORUM将测量地球电磁波谱的远红外部分。这将填补当前气候变化中长波辐射和海气相互作用的测量空白。

2.2 EE-10：“和谐”创造地球环境的更多和谐

为了争取EE第10个项目，3个项目于2018年9月进入第一次可行性研究。ESA最终选择了Harmony（和谐）进入下一阶段的开发。Harmony由两颗卫星组成并将与哥白尼Sentinel-1卫星一起在轨道上运行，项目瞄准解决与海洋、冰和陆地动力学相关的科学问题，即如研发机构TU Delft在会议报告的题目所言：解决地球系统的压力。Harmony将测量地表形状的微小变化，例如与地震和火山活动有关的变化，从而有助于风险监测。它还将允许研究冰盖快速变化的边缘区域冰川的3D变形和流动动力学，以便更好地了解海平面上升。如果ESA在2022年秋季做出全面实施的决定，两颗“和谐号”卫星还将携带多波束热红外仪器，在云层存在的情况下，仪器能够测量高分辨的云层运动；当天空没有云时，多光束热红外仪器将测量海面温差。该卫星还将是第一个同时测量风、波浪、洋流并提供数据的项目，这些数据可以提高空气和海表相互作用的认识，再加上对海面热差异和云运动的测量，

将实现前所未有的海洋大气边界层的视图。

2.3 EE-11: 4个候选方案, 个个精彩

LPS会议期间正在进行的EE-11候选项目竞争, 是会议讨论的一个重要兴奋点, 又因为4个项目涉及地球观测的广泛内容, 引发更为广泛的关注(图2)。这4个项目是从2020年5月征集得到的15个概念模型的竞争中胜出的4个, 预计将在2023年秋天分出最终胜负。

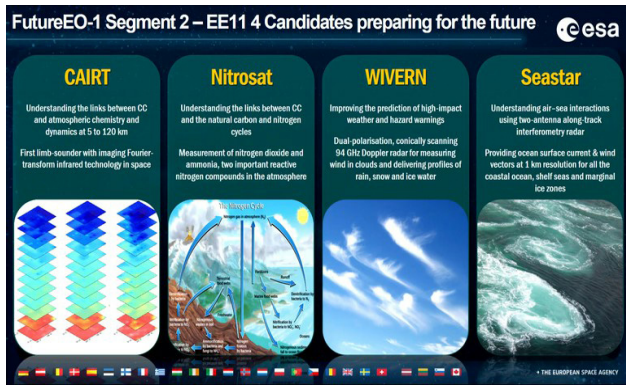


图2 EE-11的4个候选项目

4个项目观测的目标分别是大气动力层结、大气成分、海洋小尺度动力和全球风云及降水等, LPS会议特别设了分会场(EE-11候选项目: 下一个十年的科学), 请4个候选项目介绍“0阶段”进展, 而分会场的主题, 无疑是会议主办机构希望借助这些候选项目的设计思想, 引领未来EO前沿。

CAIRT (changing-atmosphere infrared tomography, 变化大气红外断层) 或成为是第一个在太空中使用傅里叶变换红外成像技术的探测器, 将关注与大气环流、成分和区域气候变化之间相互的影响, 提供现有或计划中的卫星任务无法提供的关键观测数据, 以便在了解5~120 km高度范围内的气候变化、大气化学和动力学之间的联系。

Nitrosat (氮卫星) 测量的两种活性氮化合物, 是臭氧和颗粒物的前体。这两种化合物都通过天然碳和氮循环之间的相互作用与气候变化有关, 因此, 该任务可以为气候变化下重要的社会应用和环境政策做出贡献。

WIVERN (wind velocity radar nephoscope, 风速雷达观测器) 或成为世界上唯一可以测量云中的风, 并提供雨、雪和冰水剖面的卫星。WIVERN将携带94GHz的双极化、锥形扫描多普勒雷达。该任务将提高天气预报模型中高影响天气和危险预警的预测, 并有助于云和降水剖面的气候记录。

Seastar (海星) 由英国海洋研究中心提出, 是EE-11唯一入选的海洋任务。Seastar将进一步回答有关

海洋动力学和小规模海洋过程的科学问题, 有助于理解与海洋食物链的初级生产力相关的海气相互作用。这些小尺度动力学对于石油和塑料污染的部分也很重要。该卫星将携带一个双天线沿轨干涉测量雷达。

EE-11的4个项目的竞争, 也开启了ESA的FutureEO计划。在这个崭新的阶段, 所有成功立项的项目都需要具有一个共同的特征——本质上, 是技术和科学齐头并进。

3 气象和大气科学的新增长点: 生态、水和碳循环的全面遥感数据和模拟能力

LPS会议从天基遥感角度, 重新审视和梳理了气象和大气科学与地学其他学科在交叉界面上的碰撞、碰撞可能带来深度和广度两个维度上的扩展, 会议或许是在提示我们: 天基卫星遥感快速换代和借助大气环流模式数字智慧的碰撞, 或许让生态、水和碳循环等领域与大气科学有了更紧密联系在一起的机会, 全面遥感数据和模拟能力最有可能让地球系统科学真正走向统一、面向多圈层数据。

3.1 MAAP: 或将演化为全球生态环境模拟数据的基础框架

多任务算法与分析平台 (Multi-mission Algorithm and Analysis Platform, MAAP) 在LPS国际合作主题分会的第一个报告中被提出, 具有共享数据、建立数据标准和规范、共享算法(软件)和众筹挖掘可视化和数据产品等多重意义。MAAP是欧美两个最强大的空间机构ESA和NASA的一个合作项目, 专注于提高对地球陆地碳动力学的理解。MAAP将提供一个具有与数据共存的计算通用平台, 以及为支持这一特定研究领域以及解决与提高数据速率相关的问题和加强开放数据政策而开发的一套工具和算法, 最大限度地利用BIOMASS、GEDI和NISAR等地球观测(EO)项目的数据。

MAAP的目标包括: 1) 使研究人员能够轻松发现、处理、可视化和分析来自两个机构的大量数据; 2) 提供工具和基础设施, 将数据引入同一坐标参考框架, 以实现比较、分析、数据评估和数据生成; 3) 提供支持工具、共存数据和处理资源的版本控制的科学算法开发环境; 4) 解决与协同算法开发和数据和算法共享相关的知识产权和共享问题。

3.2 卫星多维度协同观测: 更持久、精细展示地球环境变量

会议介绍了地球观测卫星协同观测的意义。在持续提供数据方面, 针对海平面变化的卫星观测项目

接力, 堪称典范之一。而在两个以上卫星项目之间相互借力, 实施更精确观测(如海冰观测)及和国家项目之间的协同, 都给出了针对卫星协同观测的各自解读。

这些协同中最值得关注的, 是不同卫星或卫星星座之间的系统, 其产生的新观测, 尤其是依靠单个卫星项目很难完成的环境变量的新观测方法, 是遥感换代技术的一个最重要的标签。借助GPS卫星星座和掩星已经发展成熟的无线电掩星大气廓线卫星遥感探测技术, 是最早并具有极大影响力的技术。在EE-10“和谐”项目中, 该卫星将与已经业务化的哨兵卫星同步轨道上运行, 试图针对地表细微形变带来类似无线电掩星技术量级的新技术创新, 尤其值得期待。

3.3 数字孪生: 吸引市场的新手段

本次会议数字孪生这一相对较新的理念, 几乎贯穿了各个分会场。会议主办机构ESA更是在多个报告中, 提出了数字孪生概念对EO的重要性: 即成为地球观测的新维度的根基, 同时已经在一些领域(水文、极地、水循环和冰雪圈等)率先得到了应用。尤其是, 数字孪生技术因为直接与应用对接, 它对EO市场的促进也不容小觑。

4 结果讨论

本次会议表明, ESA要成为天基遥感的全球领先者。从ESA不长的历史总计约80颗EO卫星系列以及作为全球EO卫星重要管理者之一参与管理的所谓遗产卫星来看, 作为引领者, ESA似乎还欠些火候。但从这些卫星的含金量, 尤其是在EO体系中具有的业务卫星和探索卫星双轨优势, 再加上哥白尼项目锦上添花, 欧洲地球观测借ESA走到世界前列, 完全有可能。

4.1 本次会议揭示的ESA EE项目的科学框架具有积极的学科发展意义

气象和大气科学, 无论从历史发展过程, 还是未来进步的走势, 观测无疑具有“第一推动”的意义和价值。为了更好地认识LPS会议大量以观测为视角的新进步信息对学科发展的意义, 以中国自然科学基金率先在地学领域推出的大气科学编码(D05)为视角, 审视LPS主题对学科的渗透(图3)。从结果中可以看到, 更多的气象和大气科学学科新增长点(析出关键词), 以及学科与地学乃至更广泛学科交叉、碰撞, 提出或启发了学科新科学问题。

4.2 ESA 在其发展框架中设置EE系列具有促进研究和借助市场智慧的效果

本次会议的一个看点, 就是ESA展示数十年来通

过地球探索者(EE)系列项目取得的领先于世界的地球观测能力和令人激动的未来发展计划。

- EE项目瞄准科研, 立项的主导是技术可实现性和对前端研究的促进。

- EE项目采用大约每3年一个阶段的周期, 通过发布招标计划方式, 吸引研究机构和商业公司参与投标, 贡献最新技术的同时, 还不断将EO的领域向地球各个圈层延伸。由于EE较少有业务人员参与其中, 这些项目, 无论是最初思想还是后来方案的完善过程, 都很少受到业务卫星(如气象业务卫星)探测范围的限制, 从而在不同时期, 让EO达到极限。

- 如其名称所言, EE项目以探索姿态开展创新活动, 其结果是让业务能力受益最大化, 其中源自EE项目的风神卫星走向业务化, 是例证。

4.3 在生态保护方面走在前面的欧洲, 或将利用其卫星遥感上的强大优势引领地球系统科学观测、模拟和预测应用的新范式

本次会议揭示的地球科学发展的一个显著新趋势, 是通过“碳循环”将地球系统统一起来的趋势。而围绕碳循环天基平台能做什么, 几乎是本次会议唯一的共同目标。“碳循环”是目前认识到的地球系统中贯穿几乎所有圈层的“大气”和“水”以外的又一个重要机制, 但是, 对碳循环的观测, 困难重重。不同圈层环境变量之间、参与碳循环众多要素之间要建立量化的观测基础和规范是无法回避的科学挑战。本次会议表明, 如多为大会报告人形成的共识: 地球轨道上, 是观测包括碳循环在内的地球环境变化的最佳场所!

值得思考的是, 无论是中国还是全世界, 最先完成全球观测网(19世纪中叶)、最先实现全球大气圈环流数值模式模拟(20世纪中叶)的气象和大气科学学科, 在人类走向以碳循环为代表的地球系统监测和模拟时, 如何将学科优势更充分发挥和拓展学科发展的领域。

本文对内容繁杂、新理念频出的LPS 2022会议的介绍, 虽然仅仅是管窥, 挂一漏万, 但还是揭示出了足够的信号: 即ESA引领的欧洲EO活动, 通过最新技术理念的提出和最先进卫星系统的设计和实现, 已经在全球展示了勃勃生机, 会以技术领先更明显的优势, 在未来5~10年重新洗牌地球观测技术和相关的学科、领域。

| 学科领域 | 天气 | 气候 | 古气候 | 大气动力 | 大气物理 | 大气化学 | 生态气象 | 行星大气 | 遥感探测 | 数据与信息 | 数值模式 | 地球系统模式 | 气候变化 | 大气环境 | 应用气象 | LPS大会亮点 |
|-------------|-----------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|--------|------|------|------|--------------------|
| 微量气体 | | | | | | | | | | | | | | | | 中间层中的金属原子 |
| Sentinel-5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 对流层和空气质量 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 温室气体 | | | | | | | | | | | | | | | | 自然碳循环 |
| 傅里叶变换光谱 | | | | | | | | | | | | | | | | 傅里叶变换光谱 |
| 气溶胶 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 风神卫星 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EarthCARE计划 | | | | | | | | | | | | | | | | 云粒子垂直速度 |
| 云和降水 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 大气的垂直耦合 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 生物多样性 | | | | | | | | | | | | | | | | 生态系统退化 |
| 生态系统核算 | | | | | | | | | | | | | | | | 环境经济核算体系/生态系统资产-服务 |
| 生态系统弹性 | | | | | | | | | | | | | | | | 生态系统完整性/破碎化 |
| 生态系统恢复 | | | | | | | | | | | | | | | | 生态系统恢复/生物量 |
| 全球牧场卫星监测 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 土壤监测系统 | | | | | | | | | | | | | | | | 土地退化 |
| 湿地 | | | | | | | | | | | | | | | | 水相生态系统、湿地清查 |
| 农业 | | | | | | | | | | | | | | | | 粮食安全预警系统、再生农业 |
| 生物量监测 | | | | | | | | | | | | | | | | 森林生物量/碳储量 |
| 土地覆盖 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 泥炭地 | | | | | | | | | | | | | | | | 泥炭地 |
| 物候学 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 新农业监测 | | | | | | | | | | | | | | | | 数据泛滥 |
| 地表温度发射率 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 森林监测 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 陆地碳循环 | | | | | | | | | | | | | | | | 荧光/植被光学深度/冠层结构/蓝碳 |
| AFOLU估计 | | | | | | | | | | | | | | | | 生物量变化 |
| 观测和模式 | | | | | | | | | | | | | | | | 数字孪生 |
| 地球观测 | | | | | | | | | | | | | | | | 全球本地化 |
| 云气候学 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 水汽 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 人为温室气体 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 内陆蓄水和径流 | | | | | | | | | | | | | | | | 3D水动态 |
| 水和能源循环 | | | | | | | | | | | | | | | | 水-能源-食物关系 |
| 水循环观测模拟 | | | | | | | | | | | | | | | | 高分水文学 |
| 灌溉管理估算 | | | | | | | | | | | | | | | | 灌溉管理 |
| 地下水管理 | | | | | | | | | | | | | | | | INSAR、地下水管理 |
| 内陆水域水质生态 | | | | | | | | | | | | | | | | 水域生态系统 |
| 人类-地球水循环 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 上层海洋环流观测 | | | | | | | | | | | | | | | | 海洋表面流 |
| 海洋碳观测 | | | | | | | | | | | | | | | | 海洋碳 |
| 海洋健康 | | | | | | | | | | | | | | | | 近海海洋生态系统 |
| 测高任务卫星 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 海洋极限 | | | | | | | | | | | | | | | | 复合事件的发生和影响 |
| 北冰洋的海洋变化 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 海洋垃圾和碎片观测 | | | | | | | | | | | | | | | | 海洋垃圾和碎片 |
| 小尺度海洋动力观测 | | | | | | | | | | | | | | | | 风-波-流 |
| 未来全球洋流观测 | | | | | | | | | | | | | | | | 多普勒频移测量海面流 |
| 海洋水色和光 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 生物地球化学网 | | | | | | | | | | | | | | | | 数字孪生 |
| 海洋表面风 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 海浪遥感 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 冰冻圈观测的连续性 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 多传感器方法 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 与卫星项目直接相关 | 与卫星项目间接相关 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 主要相关 | 较高相关 | 高相关 | 一般相关 | 较低相关 | 低相关 | 不相关 | | | | | | | | | | |

图3 用中国国家自然科学基金“大气科学”编码扫描LPS相关领域

(作者单位: 中国气象局气象发展规划院)