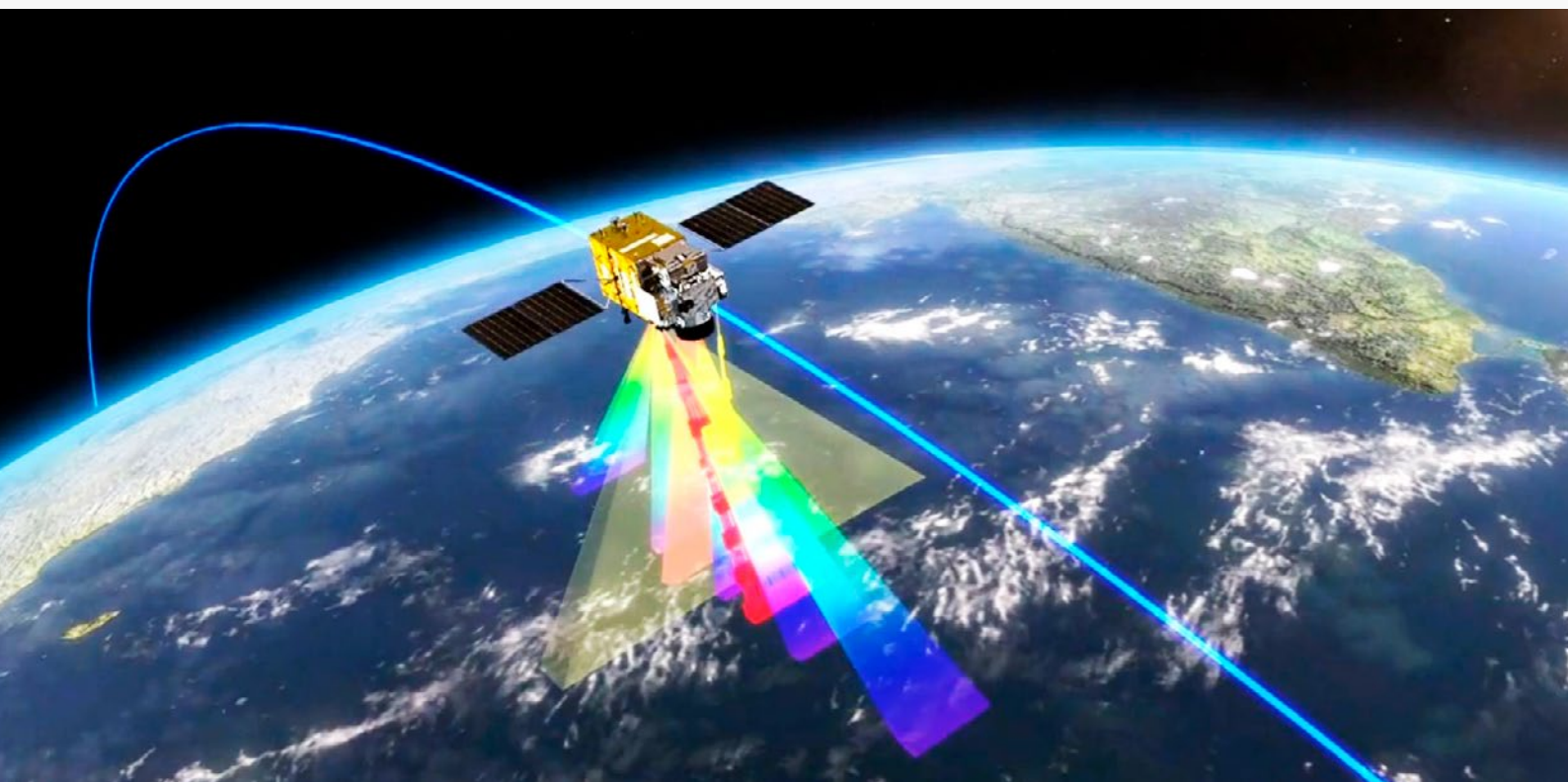




＞ 陆地生态系统碳监测卫星“句芒号”运行示意图

# 遥瞰山河 拱卫九重

## ——陆地生态系统碳监测卫星“句芒号”

□ 文图 / 曹海翊 张新伟 邱心怡 黄 缙 贺 涛



**第一作者简介** 曹海翊，研究员，博士生导师，中国航天科技集团有限公司学术技术带头人，享受国务院政府特殊津贴。2008 年至今，任资源三号 01—03 卫星总设计师；2015 年至今，任高分七号卫星总设计师；2017 年至今，任陆地生态系统碳监测卫星总设计师。获国家科技进步奖二等奖 1 项、国防科技进步奖一等奖 3 项，获中国航天基金奖、中国航天科技集团有限公司创新奖、国防科技工业武器装备型号研制一等功、五院航天功勋奖等荣誉。

2022年8月4日，陆地生态系统碳监测卫星“句（gōu）芒号”由长征四号乙运载火箭在太原卫星发射中心成功发射。

句芒是中国古代民间神话中的木神、春神、东方之神，主管树木发芽生长。2022年7月，国家航天局发起陆地生态系统碳监测卫星征名活动，最终选定“句芒号”，寓意卫星在生态保护与双碳循环中，将会为人类社会作出重要贡献，为卫星赋予独属炎黄子孙的浪漫。

“句芒号”卫星可服务于国家“碳达峰、碳中和”战略和全国重要生态系统保护与修复重大工程监测评价等工作，同时兼顾探测大气气溶胶，服务于大气环境监测。在“句芒号”卫星发射前，我国传统的碳汇测量主要依靠人工对森林植被进行抽样监测，陆地生态系统碳监测卫星的应用将改变这一现状，标志着我国碳汇监测进入天基遥感时代。

### “句芒”凌空 辅弼生态 ——陆地生态系统碳监测 卫星工程缘起

温室气体排放引发全球气候变化，作为生态、环境和发展领

域的重大全球性问题，受到各国高度重视和社会普遍关注。2018年，联合国政府间气候变化专门委员会发布《全球升温1.5℃》特别报告，拉响警报：全球变暖真实影响比《巴黎协定》预测情况更为严重，若全球持续升温超过1.5℃阈值，将在2040年遭遇气候大危机，引爆地



＞ 陆地生态系统碳监测卫星“句芒号”发射现场

球生态环境灾难。研究表明，温室气体中二氧化碳占比最大。煤炭等化石燃烧释放二氧化碳，称为“碳源”过程，植被光合作用吸收二氧化碳转化至自身和土壤中，称为“碳汇”过程。减排和固碳必须协同并举：通过绿色低碳生产生活，减少二氧化碳排放；通过陆地生态系统建设，增加陆地碳汇。

陆地生态系统包括森林、草原和荒漠等生态系统，其中森林生态系统是主体。森林是最大的陆地生态系统碳库，森林碳汇约占陆地生态系统碳汇量的 80%。近年来，随着应对气候变化国际进程持续深入推进，森林以其巨大的吸收、存储和替代功能被国际社会认为是减缓全球气候变化成本最低、综合效益最大的重要途径，并已达成共识。森林间接减排，已经纳入国际规则，在《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》中，都明确指出要通过增加森林碳汇和减少毁林排放来减缓气候变化。

林业碳汇是我国林业应对气候变化国家战略的基础支撑，国家森林碳汇抵排战略要求建设内涵全面、数据权威、模型可靠、参数合理、反应快速的森林碳汇计量监测国家体系，以测准算清森林碳汇，科学阐明中国生态建设和保护在应对气候变化方面的作用和贡献，服务好国家气候变化内政外交两个大局。对内，掌握我国碳汇的现状、变化、结构、潜力及分布，满足国家控制温室气体排放行动目标和森林增汇

●《联合国气候变化框架公约》（United Nations Framework Convention on Climate Chang, UNFCCC, 下文简称《公约》）于 1994 年 3 月 21 日正式生效，是世界上第一个为全面控制二氧化碳等温室气体排放，应对全球变暖给人类经济和社会带来不利影响的国际公约，也是国际社会在应对全球气候变化问题上进行国际合作的一个基本框架。《公约》要求各国为应对气候变化采取行动，确立了发达国家与发展中国家“共同但有区别责任”的原则，要求发达国家率先采取减排行动。

●《京都议定书》是《联合国气候变化框架公约》的补充，于 1997 年 12 月在日本京都举办的《公约》第三次缔约方大会上通过。《京都议定书》旨在限制发达国家温室气体排放量，以抑制全球变暖，具有法律约束力。



> 碳汇示意图（来源：www.pixabay.com）



＞百草丰茂

能力考核需要，保障国家碳排放权交易试点下的林业碳汇交易顺利推进；对外，支撑国家温室气体排放碳汇清单短周期、高透明、完整一致的编制需求，应对国际对碳排放和碳吸收数据可测量、可报告、可核查压力，服务气候谈判碳汇核算规则制定工作。

为加强陆地生态系统碳监测能力，服务国家应对气候变化和陆地生态系统调查监测评估工作，经国家航天局、中国空间技术研究院和原国家林业局多年论证和努力，提出了研制一颗陆地生态系统碳监测卫星（Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite，TECIS）的建议，并纳入《国家民用空间基础设施中长期发展规划（2015—2025年）》，于

2017年1月正式立项启动研制。

陆地生态系统碳监测卫星“句芒号”是世界上首颗森林碳汇主被动联合观测的遥感卫星，也是我国首颗以激光雷达为主载荷，以高精度监测陆地生态系统碳储量、森林资源和森林生产力为主要任务的定量遥感卫星。卫星采用主、被动遥感相结合的体制，综合运用激光、多角度、多光谱、超光谱、偏振等遥感手段，可实现植被生物量、叶绿素荧光、气溶胶分布的高精度定量测量，确保获取数据的“准、全、细、精”，为碳汇储量监测、生态资源详查、国家重大生态工程监测评价等方向提供高质量的遥感数据。

## 累黍无遗 明若指掌

### ——植被测高结果“准”获取森林信息“全”

植被生物量指某一时刻单位面积内实存生活的有机物质（干重）总量，单位是千克/平方米。蓄积量是指一定森林面积中现存的活立木总材积（即森林中实存生活的林木树干部分的木材总体积），单位是立方米。植被生物量和蓄积量反映了森林生态系统最基本的数量特征，可以有效地评估森林的固碳能力。

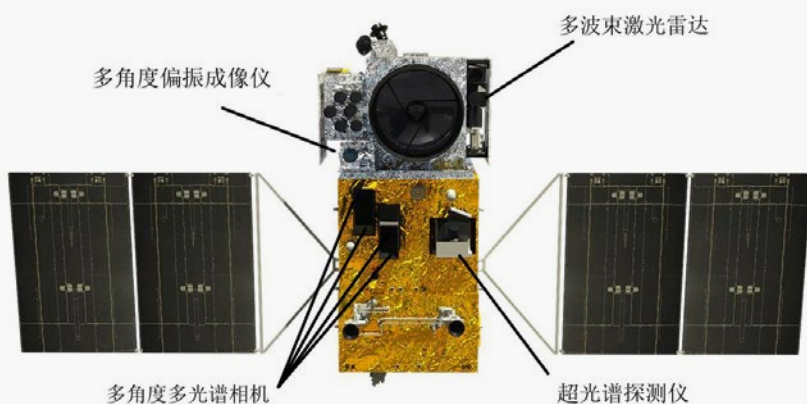
传统的生物量测量方法是人工实地抽样测量单木的树高和胸径，估算林木体积和重量。但因森林资源环境不断地变化更新，地面环境复杂多变，这种方法

已经很难适应现代林业发展的需要。而遥感技术的出现和发展，弥补了传统方法的不足，可以大幅度提高森林生物量估测的效率及精度，能够更好地服务于全国林业的数字化治理。

陆地生态系统碳监测卫星采用主动遥感和被动遥感“两把尺子”相结合的方式进行植被生物量探测。

第一把尺子是主动遥感的“直尺”，利用5波束、40赫兹重复频率的星载激光雷达，通过极高的角分辨率、距离分辨能力、抗干扰能力等独特优势，

能够高精度地获取地表物体的高度信息。当被测目标为森林树木时，激光波束首先到达树顶，一部分激光被树冠反射回去，另一部分激光则沿缝隙穿透



“句芒号”载荷联合工作示意图

● 主动遥感指的是传感器主动向被测物发出信号，经被测物反射或散射后，返回至该传感器接收，通过分析返回信号的特征从而感知被测物的性质。本卫星的激光雷达就是主动向目标发射光脉冲信号，被森林反射后，通过分析回波光脉冲信号的形状，反演树高。

● 被动遥感指的是传感器被动接收被测物在自然环境下辐射的电磁信号，从而感知被测物性质。相机是最常见的被动传感器，通过拍摄森林等地面目标在阳光下的图片，可以反演出各种结构参数。

向下，再被树叶、枝干反射，最后一部分激光到达地面，被地面反射，由此获得的回波波形指示着树冠、树干、林下植被直至地面的垂直结构信息，根据这些回波时间差可以计算反演得出森林树高。

第二把尺子是被动遥感的“三角尺”，卫星配置了1套多角度多光谱相机，从星下点（0°）、前视19°和41°、后视19°和41°共5个不同角度对森林区域成像。与传统卫星遥感观测方式相比，多光谱相机不仅可以俯视森林冠顶，还可以从侧面观测森林疏密分布、生长态势，甚至健康状况。一方面，通过多光谱图像，可以获取表征生长状态的各种植被指数；另一方面，多个角度的成像也意味着其中包含了大量地面目标的立体结构特征信息，从而能够求解出植被的结构特征参数。

将多波束激光雷达的多点抽样数据与多角度多光谱相机的大范围光学遥感数据相结合，能够反演出森林的体积信息，即蓄积量。进一步根据不同树种的含碳系数，就可以获得区域尺度的森林生物量，进而实现大面积森林碳汇估值。

生物量观测数据可服务于林业用户的陆地生态系统碳监测、陆地生态和资源调查监测、国家重大生态工程监测评价的需求，而且可以

兼顾测绘用户的高程控制点获取任务、农业用户的农情遥感监测任务和减灾用户的灾害监测评估任务。

## 擘肌分理 洞幽烛微 ——叶绿素荧光探测“细”

植被叶绿素荧光是植物光合作用过程中产生的自发光。植物光合作用过程分为光反应与暗反应两个阶段，在光反应中，0.5% ~ 2% 的吸收光能以一种更长波长的光信号被叶绿素分子发射出来，称为日光诱导的叶绿素荧光（SIF）。

植物发射的荧光信号与植被光合作用状态直接相连，尤其是植物受到逆境胁迫（通常指对植物施加有害影响的环境因子，如水分亏缺、低温、高温、大气污染、病虫害等）时，荧光发射强度会随着叶绿素分子的效能改变而改变。因此，叶绿素荧光被认为是探测植被光合作用受植被生理状态及环境条件影响的敏感“探针”，可反映光合作用中光能利用率的变化情况，并由此估算植被



＞ 多角度多光谱相机成像示意图

初级净生产力。然而，叶绿素荧光的光谱范围极为狭窄，只有 100 多纳米的宽度，其能量在植被反射能量中十分微弱，只有 1/50 量级，因而，探寻它的难度相当之大。为了从日照环境中提取出极其微弱的荧光信号，需要利用太阳夫琅禾费暗线（即由于太阳大气和地球大气的吸收，日照辐射光谱中存在的一系列细小暗线）的特点。叶绿素荧光的波长在 670 ~ 780 纳米范围，此处存在波长为 687 纳米和 760 纳米的氧气吸收暗线。为此，卫星配置了 1 台超光谱探测器，该载荷利用精密光栅对遥感图像进行色散，产生亚纳米量级的超高分辨率精细光谱曲线，可以从夫琅禾

费暗线中得到空间连续分布的叶绿素荧光光谱信息，从而能够绘制区域 / 全球植被荧光时空分布规律，满足全球森林植被生产力评估的需求。

### 明鉴万里 信而有征——大气校正数据“精”

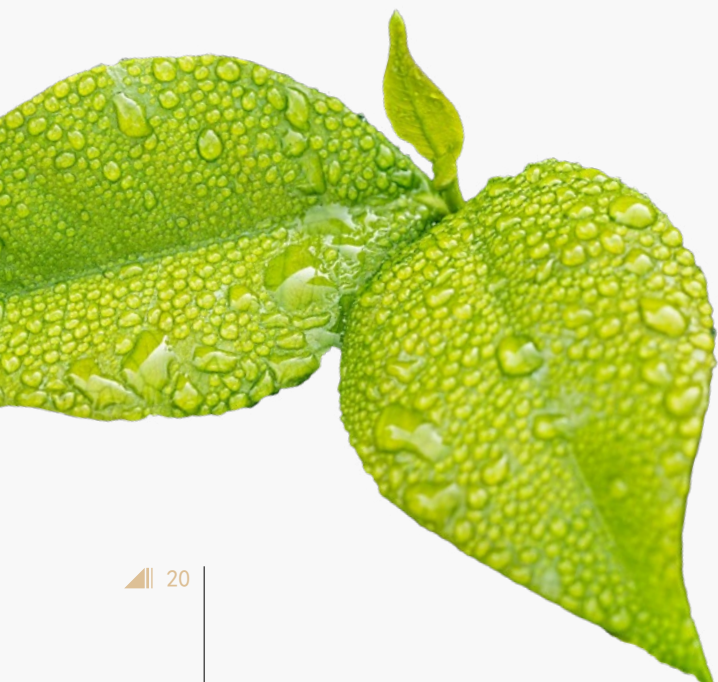
大气气溶胶是固态或液态颗粒物在空气中的悬浮体系，是地球大气的主要成分之一，有着众多的自然源和人为源。例如，火山的喷发、生物体的燃烧以及人类活动。植被生物量和叶绿素荧光的载荷配置属于辐射定量遥感器，地表气溶胶分布情况会影响遥感器的入瞳幅亮度，进而干扰反演结果。

卫星采用主、被动遥感相结合的方式对大气气溶胶的分布进行了探测。主动遥感上，利用激光雷达，探测激光与大气中的颗粒物、分子等物质相互作用产生的散射回波信号，反演出气溶胶垂直廓线分布等信息；被动遥感上，配置了 1 台多角度偏振成像仪，综合利用“多角度+偏振+多光谱”的多维信息探测，用于大气气溶胶光学厚度反演。

气溶胶观测数据一方面为其他遥感器提供大气校正数据，另一方面也可以用于反演气溶胶分布产品，可服务于环保和气象用户大气环境监测和气候变化中气溶胶作用研究的需求。

### 干霄凌云 如日方升 ——陆地生态系统碳监测卫星前景展望

陆地生态系统碳监测卫星针对生物量探测任务展开设计，实现了多载荷同平台观测和三维大气气溶胶探测，是我国首颗专门用于森林生物量探测的遥感卫星。该卫星目前已初步完成了在轨测试，激光雷达的距离测量精度优于 0.3 米，多角度多光谱相机的 0° 相机平面定位精度优于 10 米，前后视相机的平面定位精度优于 20 米。面向林业应用，地面坡度小于 5°





区域的树高测量精度可优于 1.5 米，县级区域尺度的生物量反演精度优于 85%。未来，面向更快周期、更高精度的森林遥感需求，卫星在观测效率、树高测量精准度和植被分类方面将迅速并稳健推进技术创新和提升：

采用星座组网手段提升观测效率。陆地生态系统碳监测卫星的幅宽为 20 千米，覆盖范围有限，可以通过多颗卫星组网观测的方式扩大覆盖范围，提升观测效率，满足森林季节性变化的探测需求；

采用更多波束数量、更高重复频率的激光雷达，实现更高密度的激光采样。激光采样密度由激光波束数量和测量重复频率决定，可以进一步提升激光的波束数量和重复频率，进而实现森林树高测量准确度的提高；

采用更多观测谱段实现更高精度的植被分类。可以增加植被敏感的红外波段，实现高精度植被遥

感分类，减少对地面调查数据的依赖，提高森林生物量反演的广域适应性。

“句芒号”卫星的成功发射入轨，标志着我国开始具备空间碳汇计量能力，能够满足我国陆地生态系统和资源监测任务要求，使我国具备快速监测陆地生态系统碳收支的能力，提升在应对全球气候变化和环境问题中的战略地位。当前，陆地碳汇监测遥感已经实现从无到有，正在进一步提升定量化水平、高精度反演技术。利用卫星遥感，切实践行“绿水青山就是金山银山”发展理念，为我国实现“碳达峰、碳中和”目标提供技术支撑，为建设“美丽中国”发挥“遥感力量”。

---

第一作者单位 / 中国空间技术

研究院遥感卫星总体部

---

（本文编辑：何陈临秋 张佳楠）