## 全球碳盘点，卫星来帮忙

**实现“双碳”目标，科技是支撑。其中，卫星遥感正在成为国际认可的新一代全球碳盘点方法——碳从哪里排放？减了多少碳？还有多少排放需要中和……精准的全球碳盘点是实现“双碳”目标的先决条件。那么，当前卫星遥感技术对全球碳盘点任务具备哪些支撑能力？中国开展全球碳盘点卫星遥感监测的重点任务是什么？我们将如何建设中国全球碳盘点卫星遥感体系？**

**为什么要做碳盘点？**

**将每一项减碳措施的效果明确化，把每一项减排措施的贡献算出来**

　　以全球变暖为主要特征的气候变化已成为全球性环境问题，对全球可持续发展带来严峻挑战。目前，国际社会已逐步达成“温室气体减排是抑制全球增温最有效途径”这一共识。

　　目前，世界范围内已建设了节点遍布全球的温室气体地基观测网络，包括如世界气象组织组建的全球大气地面观测网（GAW）、美国、欧洲和加拿大等国家分别建立的温室气体观测网络以及我国由国家大气本底站、国家气候观象台和国家及省级应用气象观测站等组成的中国温室气体观测网等。通过这些观测网络，人们可以得到自然排放的温室气体状况。

　　但这对于“双碳”目标还远远不够。确定温室气体减排的情况，以及确定各国承诺的减排指标是否达到并不容易。有几个问题亟待弄清：大气中温室气体的总量是多少？属于人为排放的有多少？各个国家的排放量是多少？将每一项减碳措施的效果、剩余碳排放、如何实现碳中和等明确化，将每一项减排贡献真实透明地测算出来，就是碳盘点的具体任务。

　　在全球碳计划2020年报告中，人类活动、大气、陆地与海洋生态系统的碳收支结果，包括五方面内容，即大气中CO2浓度及增量、化石燃料和工业排放、土地利用变化碳排放、陆地生态系统碳汇和海洋生态系统碳汇等。

　　其中，人类活动碳排放是全球碳盘点的核心任务。为了探明人类工业活动产生的碳排放，还必须确定并区分陆地和海洋生态系统吸收和释放了多少CO2，需要监测火山爆发、森林砍伐、火灾等自然释放和土地利用变化排放的CO2等。碳中和目标以及全球碳盘点的现实压力，就是利用各种先进技术和方法，来监测大气CO2浓度的时空变化及其来源，高分辨、高精度估算全球碳通量。

　　为了准确评估世界各国的温室气体减排情况，提高我国碳排放量评估的主动权，维护我国在全球碳盘点中的核心利益，建立自主可控的全球温室气体监测体系势在必行。

　　这其中，卫星遥感技术能派上大用场。

　　**卫星碳盘点有多“火”？**

**国际卫星对地观测委员会明确提出，将在2025年形成星座业务化运行，支撑2028年全球碳盘点**

　　基于传统地面站点的观测数据，难以准确了解温室气体的源汇变化特征和机制。而卫星遥感具有客观、连续、稳定、大范围、重复观测的优点，也正在成为新一代、国际认可的全球碳盘点方法。国际卫星对地观测委员会明确提出，将在2025年形成星座业务化运行，支撑2028年全球碳盘点。

　　迄今，国际上欧洲、日本、美国、加拿大和中国相继发射了具备大气CO2浓度观测能力的卫星。日本于2009年成功发射GOSAT卫星，这是第一颗专门用于大气温室气体CO2和CH4探测的卫星，至今运行良好，后续的GOSAT系列卫星则致力于实现更高精度、更强空间覆盖能力。美国在温室气体遥感探测方面走在国际前列——2021年12月，美国白宫发布了《美国空间优先框架》，明确美国将优先支持应对气候变化行动的卫星遥感计划，通过政府、私营和慈善机构之间的合作，利用地球观测数据支持美国和国际社会应对气候危机。

　　中国近年来在温室气体卫星遥感探测方面也是突飞猛进。2016年12月，首颗碳卫星发射，这是中国自主研制的全球大气二氧化碳观测实验卫星，其数据在全球大气CO2浓度、叶绿素荧光监测等方面取得系列重要成果。2018年5月，高分五号卫星成功发射，搭载的温室气体监测仪GMI的主要功能是定量监测CO2和CH4的全球浓度分布变化。

　　同时，我国还在不断酝酿新的卫星计划。未来计划发射的风云三号08星上搭载的高光谱温室气体监测仪，通过对近红外、短波红外谱段连续高精度、高光谱分辨率、高空间分辨率和高采样率观测，实现全球大气温室气体的高精度定量反演。2022年4月发射的大气环境监测卫星是国际首颗搭载CO2探测激光雷达的卫星。

　**卫星还要掌握哪些“本领”？**

**不仅能“看”，还要能“算”**

　　当前卫星遥感可以探测大气CO2浓度，但是对于决策部门而言，更想了解大气CO2的来源并提取出其中来自人类活动排放的部分。这对卫星遥感系统而言是一项挑战。

　　利用卫星开展生态系统碳汇估算的方法主要分为三类：基于温室气体浓度探测的同化反演的“自上而下”方法、基于生态过程模型模拟的“自下而上”方法以及基于数据驱动的机器学习模型方法。然而，各种方法的碳源汇估算均存在不确定性。

　　总体来说，全球碳源汇的巨大不确定性既源于碳循环模式的理论和认知缺陷，又包括缺乏精细时空分辨率的观测数据。由国际地圈-生物圈计划、全球环境变化人文因素计划和世界气候研究计划共同发起了全球碳计划,其关键是准确量化全球碳循环格局和变率。我国于2010年启动的全球变化研究国家重大科学研究计划、2016年启动的国家重点研发计划“全球变化及应对”专项中，摸清生态系统碳循环均为核心任务之一。2017年立项的国家重点研发计划项目“全球生态系统碳循环关键参数立体观测与反演”，其核心任务是研制覆盖全球、参数完备、时空分辨率精细、连续一致的碳循环关键参数产品，共包含24种全球碳循环关键参数的长时间序列空间观测产品。这些丰富的碳循环关键参数产品，为陆地生态系统碳源汇的动态精细评价提供了重要基础数据。

　　除了提高观测数据质量与数量，还需考虑如何充分利用大量多源的观测资料，协同地面和遥感技术手段，降低模型不确定性，可以进一步提高模型估计陆地生态系统固碳速率准确性。

　　我们认为，全球碳同化系统是解决这一问题的有效途径。联合同化卫星和地面大气CO2浓度、站点通量数据、遥感地表参数等数据，同时优化生态系统和人为源碳通量是全球碳同化系统的发展趋势。2016年，南京大学发展了全球碳同化系统，能更好地揭示不同地区陆地碳汇的时空分布和年际变化，该系统已经具备了业务运行能力。

　　由于人为源碳排放和陆地生态系统碳通量混合，如何利用碳同化系统优化计算人为源碳排放，是科学家们力图解决的重要问题，也是实现碳中和目标的重要技术需求。发展区域高分辨率碳同化系统同化大气浓度观测数据，是进行人为源碳排放优化估算的有效手段。

　**下一代碳卫星有多“高大上”？**

**中国的碳卫星监测解决方案正在部署中**

　　全球碳盘点不仅需要卫星遥感提供高时空分辨率大气CO2等观测数据，更需要通过观测系统与同化反演系统集成，提供高时空分辨率的大气CO2的溯源解析数据，如人为碳排放、生态系统碳源汇等。

　　尽管卫星探测能力得到了有效提高，但是任何单独一颗卫星都无法满足CO2和CH4全球探测的需求。根据科学目标将多颗卫星组成一个虚拟的卫星星座，开展多颗卫星组网观测是满足快速增长的全球业务化观测需求的有效途径。

　　同时，第二代碳卫星的核心目标是服务于全球碳盘点的清单校核，不仅要求卫星载荷系统提供宽幅、高分辨率、高精度的观测能力，还需要通过同化反演系统，监测碳通量，并区分和量化人为碳排放。

　　为了满足全球温室气体清单校核需求，对中国下一代碳卫星在温室气体清单校核需求目标、科学产品技术指标以及卫星组网观测能力需求方面提出了明确的要求，包括监测CO2、CH4、CO、NO2、SIF、气溶胶和N2O七种要素，并能达到较高精度；针对不同尺度设计了传感器相应的空间分辨率，在全球和热点区域分别对应2公里×2公里，0.5公里×0.5公里的空间分辨率，并且具有1天的时间分辨率，幅宽达1000公里，以满足观测需求。

　　这对载荷研制提出了非常苛刻的要求，如何在工程技术上平衡光谱分辨率、信噪比、空间分辨率与幅宽的制约关系存在巨大挑战。在碳卫星观测要素的遥感反演算法研究基础上，结合当前载荷工程研制能力，初步确定了下一代碳卫星载荷技术指标，包括设计了NO2、O2A，弱CO2、强CO2、CH4五个吸收带，波长范围在0.4纳米至2.385纳米之间，光谱分辨率最高能达到0.12纳米。

　　尽管下一代碳卫星比第一颗碳卫星有巨大的飞跃和进步，但卫星成像监测也受到轨道、天气等诸多因素的影响，无法实现连续动态观测且分辨率不高，仅凭卫星遥感难以取得满意效果。因此，必须结合地基监测、航空遥感等多源数据，才能实现点源、城市、国别尺度的温室气体排放的精确估算。目前，生态环境部、中国气象局、中国科学院等机构正在组织和实施大范围地基温室气体观测任务，已初步建成、并正在逐步完善国家温室气体观测网络，温室气体卫星星座与地基网络的协同，为中国碳达峰、碳中和行动成效的科学评估与碳排放核算提供了重大机遇。

　　科学家提出，为了实现面向碳盘点的卫星监测目标，需要优先部署如下7个方面任务：开展下一代碳卫星研发与运行，服务于全球和重点区域碳监测需求；针对中国下一代碳卫星及载荷指标特点，结合国内外多源卫星数据，开展高精度碳监测卫星遥感科学关键技术研究和共享产品研发；面向全球碳盘点的需求，开展高时空分辨率、高精度、高时效性的碳排放清单的卫星校验方法研究；面向重要点源目标碳排放卫星监测的需求，推进重要点源碳排放卫星监测技术；面向全球碳盘点和国家碳中和需求，发展高时空分辨率、高精度、长时间序列的全球生态系统碳通量监测技术；面向全球碳盘点和国家碳中和需求，发展高时空分辨率、高精度、长时间序列的全球土地利用碳排放监测技术；围绕全球碳盘点和国家碳中和战略对空间信息技术的需求，推进碳卫星科学计划项目集成与国际合作。

　　面向全球碳盘点和中国双碳目标需求，需要利用卫星遥感、大数据、碳同化等先进技术和方法，实现高时空分辨率、高精度、高时频的大气温室气体浓度监测，并提供高精度、高分辨率的人为源碳排放和生态系统碳源汇科学数据，阐明大气温室气体的来源、并有效区分与量化人为源和自然源的通量贡献，建立全球、国家和热点区域的温室气体排放的监测和验证支撑技术体系。