

文章编号:1671-4229(2023)05-0001-09

基于国产高分卫星的森林碳汇估算技术研究进展

王晋年, 夏 慧, 王大康, 杨现坤, 杨颖频, 罗逸云, 侯 璐

(广州大学 a. 地理科学与遥感学院, b. 空天遥感创新研究院, 广东 广州 510006)

摘要: 在全球气候变化背景下, 实现碳达峰与碳中和是应对气候危机的重要举措, 增汇减排作为其中的关键手段, 如何高效估算森林碳汇成为目前研究的重点内容之一。文章依照“自下而上”与“自上而下”的划分思路, 并以不同数据源为出发点, 梳理总结了主要估算方法, 构建当前森林碳汇估算方法分类体系; 重点关注国产高分卫星数据在森林碳汇估算中的主要应用场景及适用性, 探讨分析其优势与不足, 以期为森林碳汇估算提供数据源选择思路和方法论参考。

关键词: 森林生态系统; 碳汇估算; 卫星遥感; 国产高分卫星

中图分类号: K909 **文献标志码:** A

Comprehensive review on forest carbon sink evaluations based on Gaofen satellites

WANG Jin-nian, XIA Hui, WANG Da-kang, YANG Xian-kun,
YANG Ying-pin, LUO Yi-yun, HOU Lu

(a. School of Geography and Remote Sensing, b. Institute of Aerospace Remote Sensing Innovation,
Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In the context of global climate change, carbon peak and carbon neutrality are important measures to deal with the climate crisis. Increasing carbon sinks and reducing carbon emissions are the key measures. Accurate estimates of forest carbon sink is one of the core steps during the implementation of the measures. According to the differences in the approaches of “bottom-up” and “top-down” carbon sink evaluations, we reviewed the major forest carbon sink estimation methods based on data sources and constructed a framework for the classification of current methods. Also, we focused on the major scenarios and applicability of China’s Gaofen satellites in forest carbon sink evaluation. We then discussed their advantages and deficiencies in order to provide reference for the determination of data sources and methodology for future forest carbon sink estimation in China.

Key words: forest ecosystem; carbon sink evaluation; remote sensing; Gaofen satellites

当今世界, 全球气候变化已经演变为人类必须攻克的重大难题, 为避免气候剧烈变化所造成的极端危害, 探寻应对措施成为全球性共识。在此背景下, 《京都议定书》^[1] 与《巴黎协定》^[2] 等气

候变化国际公约相继出台。为进一步科学评估碳排放及其风险, 联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 成立, 以保障《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 的推进实施^[3]。截止到 2021 年年

收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-08-30

作者简介: 王晋年(1966—), 男, 教授, 博士生导师. E-mail: jnwang@gzhu.edu.cn

引文格式: 王晋年, 夏慧, 王大康, 等. 基于国产高分卫星的森林碳汇估算技术研究进展[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(5): 1-9.

底,全球已有 136 个国家承诺尽早实现净零碳排放。中国作为全球最大的碳排放国,制定 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的战略路径对实现绿色工业化、调节全球气候具有重大意义。从相对减排目标到绝对减排目标^[4],中国政府聚焦增汇减排相关技术研发,踔厉提升碳汇本底监测与碳汇估算能力。

森林碳汇是森林植被通过光合作用吸收 CO₂,并以生物量形式将其固定在植物体或土壤中的一种机制,森林生态系统作为陆地生态系统中最大的碳库,估算与量化森林碳汇成为评价森林生态系统固碳能力和评价生态效益的重要指标,也是推动林业碳汇交易发展、提高碳汇监测能力的关键一环^[5-6]。

在森林碳汇估算方法中,传统地面调查往往难以满足全球化的资源调查与森林植被参数反演需求,而卫星遥感凭借其连续、稳定、大尺度与可重复观测等优势为森林碳汇估算提供了新的技术手段。多光谱卫星、高光谱卫星在识别森林树种、估计森林郁闭度或计算叶面积指数等方面具有优势^[7],但涉及森林垂直结构特征时则显得无能为力;微波雷达与激光雷达擅长森林内部结构特征提取,能够有效估测林下地形与生物量,显著提升精度,但其反演复杂性也相应增加,需要考虑林下状况与地形等多重因素;具备温室气体观测能力

的卫星对碳通量信息更为敏感,便于实现大尺度分析及数据的比较验证,目前,融合多源遥感数据成为主流趋势^[8-9]。然而,大多研究只聚焦于国际先进遥感卫星,针对国产高分卫星数据在这一领域的梳理却相对较少,难以形成对我国森林碳汇技术现状全面系统的认识。

综上所述,为弥补传统测量方法的不足、早日实现双碳目标,本文将构建以遥感技术为支撑的长时序、大范围、多层次森林碳汇估算体系,并探讨国产高分系列卫星在该主题中的发展动态,并与国际卫星展开对比研究,希冀为森林生态系统的碳汇估算提供完备的方法论参考。

1 森林碳汇估算方法

森林碳汇估算方法通常被分为“自下而上”和“自上而下”两种形式以作明显区分,前者利用小区域观测数据外推大区域碳汇情况,后者基于大气 CO₂ 光谱吸收特征与气象驱动等资料,结合大气传输模型反演碳循环过程。如图 1 所示,本研究基于该体系,从数据源出发,将森林碳汇估算方法分为 4 种形式,其中,生物量法、模型模拟法与微气象法归为“自下而上”类,大气反演法归为“自上而下”类。

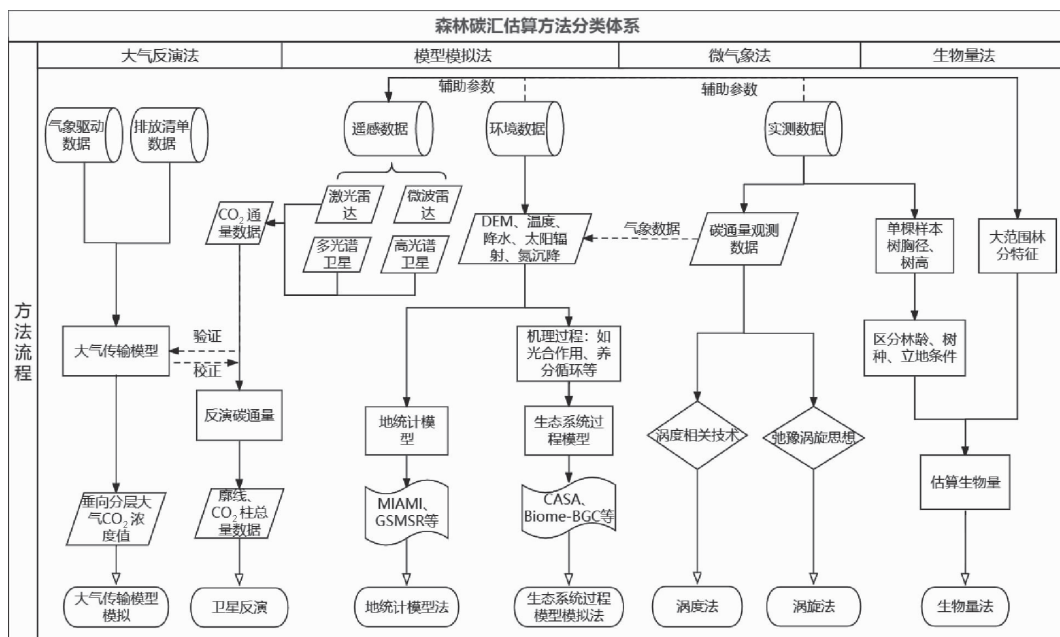


图 1 森林碳汇估算方法分类体系

Fig. 1 Carbon sink estimation method classification system

1.1 生物量法

生物量法以实地或遥感手段测量生物量为中间过程,实现碳汇估算。其中,平均生物量法通过实测单棵树木样本得到不同类型森林的单位面积生物量,适于小尺度及分布均匀的森林区域研究^[10]。生物量转换因子法引入林分生物量与木材材积的比值,即生物量转换因子(BEF),可满足大范围碳汇估算需求。考虑到转换因子会随林龄、树种、立地条件等发生变化,方精云等^[11]提出换算因子连续函数法,建立了材积与转换因子的关系式,如下列公式所示:

$$BEF = a + b/V,$$

式中, V 为林分蓄积量, a 和 b 为常数。该式可综合反映各因素对生物量的影响。此外,其他生物量法如蓄积量法、生物量清单法等逐渐关注林下生物量部分,估算精度得以提高^[12-13]。

1.2 模型模拟法

1.2.1 地统计模型法

结合地面调查数据与海拔、地形、温度、降水

和氮沉降等环境变量建立不同模型,可实现森林碳汇的间接运算,模型包括K-近邻、随机森林、人工神经网络和MaxEnt模型等^[14-16]。植被净初级生产力(NPP)、净生态系统生产力(NEP)作为评估森林碳汇能力的指标,不少的统计模型围绕二者展开,如GSMSR模型^[17]通过构建土壤呼吸与温度、降水和上层土壤有机碳密度的关系,实现NPP估算。

1.2.2 生态系统过程模型法

为进一步考虑森林生态系统自身机理,如地面上植物光合作用、呼吸作用、养分循环和凋落物分解等过程^[18],引入了生态系统过程模型,该模型不断推陈出新,如CASA^[19]、Biome-BGC^[20]、INVEST^[21]和CEVSA^[22]等模型,其中,CEVSA-ES模型^[23]不仅囊括了植物生理、碳氮分解、水分动态模拟、分配与凋落等过程,还增加了土壤侵蚀模块,细致详尽地模拟生态系统作用机理。此类模型在设计上已具有显著的生态意义,但参数选择的不确定性仍然存在(表1)。

表1 森林碳汇估算方法汇总

Table 1 Summary of forest carbon sink estimation methods

估算方法		优点	缺点
生物量法	平均生物量法	适合小尺度、分布均匀的森林生长区域	只计算地上部分,样地选择有限制
	生物量转换因子法	适合大尺度、长时序研究	受转换系数影响,存在不确定性
模型模拟法	地统计模型法	考虑环境因素,实现动态评估	模型粗糙,参数存在不确定性
	生态系统过程模型法	考虑森林自身机理过程与人类活动干扰	模型复杂,参数存在不确定性
微气象法	涡度法	适合小区域研究 季节与年际动态评估、结果精度高	观测站分布稀疏且不均匀 尺度转换、复杂地形观测技术难题
	涡旋法	适合小区域研究、结果精度高	成本高、操作要求高
大气反演法	大气传输模型模拟	模拟先验廓线信息、数据比较与验证 CO ₂ 时空动态演变分析	模式复杂、粗空间分辨率
	卫星反演	反演廓线、CO ₂ 柱总量数据 生成大尺度时间序列数据	数据受气溶胶等干扰,粗空间分辨率

1.3 微气象法

1.3.1 涡度法

考虑大气与下垫面之间的物质交换与能量流动过程,涡度法以精细时间尺度与长时序协同观测方式深究森林碳循环过程,能够获得连续、短时、高分辨率的大量CO₂通量数据与气象变化数据^[24]。在涡度相关技术支持下,中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)创建已超过20

年,其中不乏基于森林生态系统的CO₂通量观测站,为森林生态系统碳收支的观测研究提供了数据支撑^[25-26]。

1.3.2 涡旋法

涡旋法分为涡旋积累法与弛豫涡旋积累法,后者根据风速大小与风向对气体样本按照定时采样的准则直接采取样本,得到森林各部分碳通量。基于涡旋法的研究对设备仪器和操作人员的要求

都较高,国内利用涡旋法展开碳汇监测的研究应用还并不多见^[27-28]。

1.4 大气反演法

1.4.1 大气传输模型模拟

大气传输模型是建立起地表碳汇通量与大气 CO₂ 浓度之间关系的有效工具^[29-30],基于模式模拟获取 CO₂ 浓度数据是主要方法之一,目前应用广泛的包括全球大气化学模式 GEOS-Chem^[31]、中尺度空气质量模式 WRF-Chem^[32-33]、NOAA 基于大气传输模型 TM5 研发的大气反演模型 Carbon Tracker^[34]和全球三维大气化学传输模型 MOZART-4^[35]等。应用最广泛的 GEOS-Chem 模式使用气象驱动数据、排放清单数据和全球空气污染情景数据等模拟垂向分层大气 CO₂ 浓度值,根据 CO₂ 先验廓线信息可转换为柱浓度数据形成 CO₂ 柱浓度数据集^[36-37],能够用于碳相关的时空动态演变分析、驱动因素探索以及卫星观测数据的产品应用评估。

1.4.2 卫星反演

基于卫星数据的大气反演法利用卫星观测数据的原始光谱信息结合大气传输模型反演碳通量,进而估算碳汇。该方法需要借助专用 CO₂ 探测卫星或具备温室气体监测能力的传感器获取数

据,利用这些数据源可读取异常变化值、生成时间序列数据等^[38],实现以宏观尺度研究碳循环的时间与空间变化规律^[39]。然而,碳卫星观测会受到云量、地表反照率以及气溶胶等干扰使得数据不连续,大尺度观测形成的粗空间分辨率也是亟需解决的问题之一。

2 国产高分卫星在森林碳汇估算中的应用

我国高分系列卫星立足自主研发,卫星技术水平不断升级改进,逐渐跻身世界领先水平,形成了具有高空间分辨率、高时间分辨率、大宽幅和回访周期显著提高的国产高分辨率卫星观测系统,协同中、低分辨率地面观测技术、多卫星组网运行,为丰富高分辨率遥感数据源、改善数据精度提供了新方向。目前,国产高分系列卫星已发射的卫星包括高分一号至高分十四号,其中包含光学遥感卫星、雷达卫星和光学立体测绘卫星等多种不同定位卫星。在森林碳汇估算过程中,国产高分卫星数据扮演着重要角色,从森林树种识别、叶面积指数反演、森林健康监测,到碳浓度追踪都表现出了相当水平(表 2)。

表 2 应用于森林碳汇估算的主要国产高分卫星概况

Table 2 Overview of main domestic high-resolution satellites applied to forest carbon sink estimation

卫星定位	高分卫星	传感器	优势	不足
光学遥感卫星	GF-1	PMS/WFV	光谱信息丰富,易于森林树种识别、郁闭度估计、估算生物量及生化参数提取	复杂林分光谱差异小,光谱信号易饱和,只能提取森林水平特征
	GF-2	PMS		
	GF-4	VNIR/MWIR		
	GF-6	PMS/WFV		
微波雷达卫星	GF-3	SAR	穿透能力强,易于反演森林生物量,可提取森林冠层结构信息	受林木结构、地形因素等影响
高光谱大气监测卫星	GF-5	EMI/GMI/DPC/AIUS/AHSL/VIMS	区域碳通量同化,碳汇估算方式更直接	反演复杂性增加,技术尚不成熟
光学/激光立体测绘卫星	GF-7	DLC/MS	提取森林树高信息,树种识别	受林木结构、地形因素、云雾等影响,应用较局限

2.1 生物量估算

生物量能够揭示森林生态系统的物理化学过程与内部能量特征^[40],利用国产高分卫星可实现森林生物量估算。高分系列中的光学遥感卫星如 GF-1、GF-2、GF-4、GF-6 与 GF-7 等都具有反射光谱差异特征,可基于此提取特征变量,并借助多元

逐步回归分析、K 最近邻等方法实现森林生物量估算;微波雷达卫星 GF-3 则通过后向散射系数与树高、胸径、树干生物量等的强相关性估算生物量,如以 GF-3 SAR 为数据源,提取后向散射系数与极化分解特征后可反演研究区内的森林地上生物量^[41]。

在森林生物量反演的诸多研究中,不少学者将国产高分卫星与国际先进遥感卫星相对比,研究发现,利用国产高分卫星估算生物量的模型精度显著优于 Landsat 8 影像,且与 Sentinel-2A、SPOT-6 等卫星的反演结果精度较为接近,说明国产高分卫星在森林生物量反演上具有巨大潜力。如使用 GF-2 卫星影像结合野外测量数据,构建随机森林模型反演北亚热带森林生物量,模型精度达到 0.88^[42-43];为充分发挥国产高分卫星数据的优势,有研究联合 GF-3 PolSAR 与 Landsat-8 OLI 数据反演森林地上生物量,结果表明,其结果精度要优于二者单独估测时的精度^[44];此外,通过建立激光雷达 ICESat-2 与 GF-2 间的协同模型,将雷达影像获取的条带范围内的树木碳密度进行外推,可实现全覆盖、大区域的树木碳密度精确测量^[45],由此可见,在多源数据协同反演的过程中,高分系列卫星发挥的作用不容小觑。

2.2 参数反演提取

2.2.1 生物物理参数

估算森林碳汇涉及的生物物理参数包括树高、胸径、叶面积指数、森林覆盖度和郁闭度等,从植被本身出发,改善森林识别与分类精度。

(1) 森林树种识别

高分系列卫星具备树种高精度识别能力,利用光谱信息丰富的光学遥感卫星,结合支持向量机、CART 决策树和随机森林等机器学习算法便于识别森林表层信息,如应用 GF-2 卫星影像的光谱及纹理属性可划分不同树种及树龄,总体分类精度达到 87.4%^[46]。而高光谱数据凭借其波段数量丰富、图谱合一特性,可基于光谱特征技术根据吸收谱带识别出独特树种^[47],如结合 GF-5 AHSI 与 GF-6 PMS 卫星数据,借助数字高程模型 DEM 与地面调查数据等辅助信息建立亚热带树种识别模型^[48]。为降低波段之间的强相关性,一般需要对数据进行特征提取或拟合光谱曲线以提高分类精度。此外,利用谐波分析等算法融合 GF-5 与 Sentinel-2A 影像用于森林树种识别被证实具有可行性,融合后的影像在提高空间分辨率的同时也能保持原有光谱保真度^[49]。

(2) 森林结构提取

利用合成孔径雷达(SAR)的全天时、全天候与强穿透性特性,能够精确探测森林生态系统空

间结构,SAR 的长波长波段可穿透冠层与林冠以下部分相互作用,有助于理解森林内部散射体的物理意义^[50],如整合 GF-2 光学影像、GF-3 SAR 影像与无人机数字表面模型(DSM)数据构建的生物量模型精度良好,能够充分模拟森林冠层结构信息^[51]。而 GF-7 卫星搭载的激光测高系统在提取森林垂直结构方面同样具有优势,利用激光回波波形信息可获取森林树冠至林下植被的诸多林分垂直信息,适于大区域尺度的森林结构研究,如结合 GF-7 立体图像、数字地形模型(DTM)与实测林分高度值建立线性回归,从而估算中国北部针叶林高度^[52]。此外,利用 GF-2 卫星的测摆能力形成异轨立体观测也可实现森林垂直结构探测^[53]。以上结果表明,在已知林下地形的前提下,高分系列卫星具备较好的森林冠层刻画能力,与激光雷达生成的空间格局较为吻合。

(3) 相关指数估计

由于叶片的光谱变化能相当程度地反映森林植被长势,相关指数成为反映森林碳汇能力的重要指标,如叶面积指数(LAI)、归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)、比值植被指数(RVI)、土壤调节植被指数(SAVI)等,它们为森林植被关键物候参数提取及长势模拟提供了科学依据^[54]。在国产高分系列卫星中,大多利用光学遥感卫星特性从影像中直接提取相关植被指数,如利用 GF-6 卫星的红边波段反演 LAI 及其他生理参数效果显著,可获取更丰富的植被长势信息^[55];也有研究以 NDVI、RVI、SAVI 等 5 种植被指数作为依据,对比分析 GF-1 WFV 卫星数据与地面同步实测光谱数据估算 LAI 能力的差异^[56]。同时,国产高分卫星反演的植被指数产品质量可靠,将 GF-1 生产的 MuSyQ NDVI 产品与 Landsat NDVI、Sentinel-2 NDVI 产品进行差异性分析,结果表明,基于 GF-1 WFV 的 NDVI 产品空间连续性更好、时间连续性更高,在表达物候特征方面更具优势^[57]。

2.2.2 生物化学参数

生物化学参数包括植物体内色素以及各种营养成分如氮、磷、钾等,它们能充分指示林木的生长状况,可用于定量评估林木长势。植被色素尤其是叶绿素的监测已经由叶片衍生到冠层级别,反演方式包括小波分析、光谱微分技术等。国产

高分卫星在反演生物化学参数方面已有较多应用,如结合 GF-1 卫星影像、植被高光谱数据与叶绿素含量构建叶绿素估算模型,用于植被冠层叶绿素含量反演研究^[58];利用 GF-6 的黄波段、海岸波段等实现对森林植被的黄化程度监测,进而有效监测森林生理生化特征^[59]。

2.3 土地利用变化监测

森林生态系统的长时序变化包括森林面积变化与转换类型演变。一方面,森林自身发生转化或退化,如原始森林转化为次生林;另一方面,森林向其他生态系统类型演变,不同类型的转化造成碳储量结果存在较大差异,如森林向农田或城市用地转化将释放大量碳,转化为草地则既可能是碳源也可能是碳汇^[60]。因此,需要借助卫星遥感数据估算森林的更新状况、造林或砍伐面积,判断土地利用/覆被变化(LUCC)与碳库变化程度。基于国产高分卫星数据得到的 LUCC 分类结果较为理想,如使用支持向量机对 GF-2 影像分类后的 Kappa 系数高达 0.91^[61]。为进一步提升分类精度,不同算法与融合方法不断拓展,如结合 GF-1 与 MODIS NDVI 数据,基于 STARFM 算法生成融合 NDVI 数据集,可用于土地覆被状况分类,Kappa 系数达到 0.93,精度优于单独的高分卫星影像分类结果^[62];根据极化 SAR 易于区分地物的散射机制原理,以 GF-3 极化 SAR 数据为数据源,使用随机森林与快速超像素分割方法能够大幅优化土地覆被分类结果^[63]。

2.4 区域 CO₂ 通量同化

利用具备碳监测能力的卫星反演 CO₂ 柱浓度数据,并借助大气辐射传输模型与资料同化技术可获取碳汇分布情况。在国产高分系列卫星中,GF-5 卫星搭载的温室气体探测器(GMI)采用空间外差光谱技术(SHS)获取近红外至短波红外的光谱数据,能够定量反演 CO₂ 柱浓度信息^[64]。已有研究设计出适用于 GMI 仪器特点的 CO₂ 反演方法,经过地面观测站点验证证明其精度优于 1%^[65]。为弥补 GF-5 卫星在空间分辨率上的不足,可采用自适应 Gram-Schmidt 算法(GSA)、广义拉普拉斯金字塔融合算法(GLP)等,结合 GF-1、GF-2 卫星多光谱数据相融合,极大提升数据可用性^[66-67]。但纵观现有研究,目前有针对性地利用 GF-5 卫星

开展森林生态系统碳汇估算的研究还很少。

3 结论与展望

3.1 结论

为应对全球气候动荡、减缓大气 CO₂ 浓度持续上升,我国制定了碳达峰、碳中和的国家战略目标,这一目标时间紧、任务重,开展相关碳汇监测与估算的需求日益迫切,以森林碳汇研究为支撑点提升全球碳循环研究水平是关键要素。

本文构建出森林碳汇估算方法分类体系,并以不同数据源为切入点细分为 4 类:①生物量法清晰易懂、操作简便,从小区域到大范围,从林上到林下部分,估算精度大幅提升;②模型模拟法将环境变量纳入考虑范畴,结合地统计模型或生态系统过程模型实现 NPP 估算,借助环境参数深入理解森林机理;③微气象法定期观测固定区域的 CO₂ 流动状况,实现高精度连续性监测,适于小区域、季节或年际动态评估;④大气反演法基于大气化学传输模型与 CO₂ 光谱吸收特征反演廓线、柱总量数据,可用于分析 CO₂ 浓度分布特征、全球长时序变化研究。

着眼于国内自主研发的高分系列卫星,随之相继发射与投入使用,国产高分卫星性能取得长足进展、卫星应用持续深化,形成全天时、全天候的高分辨率先进对地观测系统,为我国双碳目标提供了有力保障。相比国际同类型卫星遥感数据,国产高分系列卫星体系完善、自主可控,与国外技术差距逐渐缩小,在森林碳汇监测、林业资源调查中已经攻克解决相关技术,逐步替代同等分辨率下约 80% 的国外卫星数据^[68],成为各项业务开展的有利抓手,基本能够满足碳汇监测需求,适用于多个应用场景。但是,国产高分卫星仍然存在以下不足:①部分卫星数据获取渠道有限,数据共享性低;②无多层次产品,必须进行辐射校正、几何定标、噪音抑制等预处理过程,需同其他高精度影像做异源控制校正以保证数据精度;③数据质量整体偏低,单星覆盖能力、响应能力、重访能力与业务需求仍存在一定差距。

3.2 展望

综合来看,不论是现有技术方法还是数据质

量仍然存在局限,一定程度上制约了森林碳汇估算能力。在估算方法上,模型普适性差、核算体系不健全、估算精度待加强和过程机制探讨不够深入等问题仍然较突出;在卫星数据方面,存在监测能力薄弱、覆盖范围不足、数据误差不确定、易受干扰以及国产高分卫星与国际先进遥感卫星存在一定差距等难题。为解决以上问题,未来应争取在以下方面取得成效:

(1)对森林碳汇的估算研究由表及里、由浅至深,不断加强碳循环机制研究,厘清立地条件与人类活动等过程对森林碳汇造成的影响,以提高森林碳汇预测稳定性;注重多尺度综合观测,联合不

同方法以弥补碳汇监测的长短板,同步构建遥感模型与过程模型耦合系统,着力提升碳汇估算精度,推动碳汇观测技术迈向新高度。

(2)探索遥感数据融合策略,促进多源遥感数据间的对比验证及同化研究;生产高精度、高分辨率的卫星产品,加快实现协同观测机制,减少对单颗卫星数据的过度依赖,注重与地面观测数据的结合,构建完备观测体系,为森林碳汇研究提供更坚实的数据支撑;完善国产高分卫星组网建设、加快业务星研发,积极推进国产高分卫星覆盖能力、重访能力显著提升。

参考文献:

- [1] 涂瑞和.《联合国气候变化框架公约》与《京都议定书》及其谈判进程[J]. 环境保护,2005(3):65-71.
- [2] 联合国.(2015)巴黎协定[EB/OL].(2016-11-04)[2018-12-01].[https://unfccc.int/process-and-meetings/the-parts-agreement/the-pairs-agreement\(0\)](https://unfccc.int/process-and-meetings/the-parts-agreement/the-pairs-agreement(0)).
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[EB/OL].(2007-05-04)[2023-04-23].<https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories>.
- [4] 胡鞍钢.中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.
- [5] 刘玉兴.推进林业碳汇交易发展的思考[J].绿色财会,2016(4):3-7.
- [6] 朱建华,田宇,李奇等.中国森林生态系统碳汇现状与潜力[J].生态学报,2023,43(9):1-16.
- [7] 庞勇,李增元,余涛等.森林碳储量遥感卫星现状及趋势[J].航天返回与遥感,2022,43(6):1-15.
- [8] Peterson K T, Sagan V, Sloan J J. Deep learning-based water quality estimation and anomaly detection using landsat-8/Sentinel-2 Virtual constellation and cloud computing[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(4): 510-525.
- [9] David R M, Rosser N J, Daniel N M. Donoghue, improving above ground biomass estimates of Southern Africa dryland forests by combining Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 multispectral imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2022,282: 113232.
- [10] 令狐大智,罗溪,朱帮助.森林碳汇测算及固碳影响因素研究进展[J].广西大学学报(哲学社会科学版),2022,44(3):142-155.
- [11] 方精云,陈安平,赵淑清,等.中国森林生物量的估算:对 Fang 等 Science 一文(Science,2001,291:2320-2322)的若干说明[J].植物生态学报,2002(2):243-249.
- [12] 王玉辉,周广胜,蒋延玲,等.基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式[J].植物生态学报,2001,25(4):420-425.
- [13] 张坤.森林碳汇计量和核查方法研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [14] 肖越,许晓东,龙江平,等.基于国产高分数据的森林蓄积量反演研究[J].林业资源管理,2021(3):101-107.
- [15] 曹霸,凌成星.基于GF-1遥感数据的若尔盖高寒沼泽湿地地上生物量与土壤有机碳密度估算[J].遥感技术与应用,2021,36(1):229-236.
- [16] Zhang D N, Zhao Y H, Wu J S. Assessment of carbon balance attribution and carbon storage potential in China's terrestrial ecosystem,resources[J]. Conservation and Recycling, 2023, 189:106748.
- [17] Yu G, Zheng Z, Wang Q, et al. Spatiotemporal pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: the development of a geostatistical model and its simulation[J]. Environmental Science Technology, 2010,44(16):6074-6080.
- [18] 吕浩,彭春良,吴惠俐,等.森林生态系统不同碳库碳储量估算方法综述[J].湖南林业科技,2022,49(6):90-98.
- [19] 董丹,倪健.利用CASA模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力[J].生态学报,2011,31(7):1855-1866.
- [20] 贾畅,王丽娜,唐亚坤.利用Biome-BGC模型模拟黄土区沙棘人工林碳通量时的生理生态参数敏感性[J].林业科学,

- 2022,58(11):49-60.
- [21] 姚楠,刘广全,姚顺波,等. 基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J]. 水土保持通报, 2022,42(5):329-336.
- [22] 刘晓文,韩拓,陈惠玲,等. CEVSA 模型参数敏感性分析及参数优化——以千烟洲亚热带人工针叶林为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020,56(5):700-710.
- [23] 牛忠恩,何洪林,任小丽,等. 基于过程模型的 2000—2018 年中国陆地生态系统服务时空动态及其权衡与协同分析[J]. 生态学报, 2023,43(2):496-509.
- [24] 于贵瑞,方华军,伏玉玲,等. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展[J]. 生态学报, 2011,31(19):5449-5459.
- [25] 于贵瑞,张雷明,孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望[J]. 地理科学进展, 2014,33(7):903-917.
- [26] 龚元,纪小芳,花雨婷,等. 基于涡动相关技术的森林生态系统二氧化碳通量研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2020,37(3):593-604.
- [27] 赵林,殷鸣放,陈晓非,等. 森林碳汇研究的计量方法及研究现状综述[J]. 西北林学院学报, 2008,89(1):59-63.
- [28] Schulze E D, Lloyd J, Kelliher F M, et al. Productivity of forests in the Euro-Siberia boreal region and their potential to act as a carbon sink—a synthesis[J]. *Global Change Biology*, 1999(5):703-722.
- [29] 朴世龙,何悦,王旭辉,等. 中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J]. 中国科学:地球科学, 2022,52(6):1010-1020.
- [30] 闫芮豪. 全球不同地区大气 CO₂ 浓度数值模拟研究[D]. 南京:南京大学, 2019.
- [31] Bey I, Jacob D J, Yantosca R M, et al. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D19):23073-23095.
- [32] Zheng T, Nassar R, Baxter M. Estimating power plant CO₂ emission using OCO-2 XCO₂ and high resolution WRF-Chem simulations[J]. *Environmental Research Letters*, 2019,14(8):085001.
- [33] Dong X, Yue M, Jiang Y, et al. Analysis of CO₂ spatio-temporal variations in China using a weather-biosphere online coupled model[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(9):7217-7233.
- [34] Peters W, Jacobson A R, Sweeney C, et al. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(48):18925-18930.
- [35] Pawar P V, Ghude S D, Jena C, et al. Analysis of atmospheric ammonia over South and East Asia based on the Mozart-4 model and its comparison with satellite and surface observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021,21:6389-6409.
- [36] 霍霄,王茂华,张钦伟,等. 基于 GEOS-Chem V12.6.3 的全球 CO₂ 浓度同化系统的构建[J/OL]. (2021-06-25)[2023-04-23]. 西安理工大学学报:1-16. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210625.0931.002.html>.
- [37] 雷莉萍,关贤华,曾招城,等. 基于 GOSAT 卫星观测的大气 CO₂ 浓度与模型模拟的比较[J]. 中国科学:地球科学, 2014,44(1):61-71.
- [38] 刘良云,陈良富,刘毅,等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战[J]. 遥感学报, 2022,26(2):243-267.
- [39] 王飞平,张加龙. 基于碳卫星的森林碳储量估测研究综述[J]. 世界林业研究, 2022,35(6):30-35.
- [40] 唐守正,张会儒,胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究[J]. 林业科学, 2000, 36(S1):19-27.
- [41] 姬永杰,张王菲,徐昆鹏,等. 森林地上生物量 GF-3 全极化 SAR 数据估测研究[J]. 遥感技术与应用, 2023,38(2):362-371.
- [42] 王熙媛,张王菲,李云,等. 依据光学遥感特征优选的森林地上生物量反演[J]. 东北林业大学学报, 2022,50(4):47-54.
- [43] 菅永峰,韩泽民,黄光体,等. 基于高分辨率遥感影像的北亚热带森林生物量反演[J]. 生态学报, 2021,41(6):2161-2169.
- [44] 潘婧靓,邢艳秋,黄佳鹏,等. 联合 GF-3 PolSAR 数据与 Landsat-8 OLI 数据的森林地上生物量估测[J]. 中南林业科技大学学报, 2020,40(8):83-90.
- [45] Qin H, Zhou W, Qian Y, et al. Estimating aboveground carbon stocks of urban trees by synergizing ICESat-2 LiDAR with GF-2 data[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 76:127728.

- [46] 傅锋,王新杰,汪锦,等. 高分二号影像树种识别及龄组划分[J]. 国土资源遥感,2019,31(2):118-124.
- [47] 吴见,彭道黎. 高光谱遥感林业信息提取技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(9):2305-2312.
- [48] 栗旭升,李虎,陈冬花,等. 联合 GF-5 与 GF-6 卫星数据的多分类器组合亚热带树种识别[J]. 林业科学,2020,56(10):93-104.
- [49] Chen W, Pan J, Sun Y. Tree species classification based on fusion images by GF-5 and Sentinel-2A[J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5088-5102.
- [50] 岳春宇,郑永超,邢艳秋,等. 星载激光遥感林业应用发展研究[J]. 红外与激光工程,2020,49(11):105-114.
- [51] Zhu Y, Liu K, W. Myint S, et al. Integration of GF2 optical, GF3 SAR, and UAV data for estimating aboveground biomass of China's largest artificially planted mangroves[J]. Remote Sensing, 2020, 12(12): 2039-2050.
- [52] Liu Q, Li Z, Li S, et al. IGARSS 2022—2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Piscataway:IEEE, 2022: 5913-5916.
- [53] 倪文俭,张大凤,汪垚,等. 高分二号异轨立体数据的森林高度提取[J]. 遥感学报,2018,22(3):392-399.
- [54] 周昊强,包刚,金胡格吉乐吐,等. 桉柳灌丛关键物候参数多种植被指数遥感提取的适用性——基于 CO₂ 通量观测和 Sentinel-2 数据[J]. 应用生态学报,2021,32(12):4315-4326.
- [55] 张裔勋,齐拓野,孙源,等. 高分六号遥感影像植被特征及其在冬小麦苗期 LAI 反演中的应用[J]. 作物学报,2021,47(12):2532-2540.
- [56] 张裔勋,王磊,璩向宁,等. GF-1/WFV 在玉米叶面积指数估算中的应用研究[J]. 浙江农业学报,2021,33(5):861-872.
- [57] 张召星,李静,柳钦火,等. 高分一号卫星高时空分辨率植被指数产品验证与分析[J]. 遥感学报,2023,27(3):665-676.
- [58] 王婷婷. 基于高光谱和高分一号卫星影像的冬小麦叶绿素遥感反演[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [59] 武红敢,米国兵,曾庆伟. 高分六号宽幅数据的森林植被黄化监测应用[J]. 卫星应用,2022,130(10):37-42.
- [60] 陈广生,田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报,2007(2):189-204.
- [61] Jia K, Liu J, Tu Y, et al. Land use and land cover classification using Chinese GF-2 multispectral data in a region of the North China Plain[J]. Frontiers of Earth Science, 2019, 13: 327-335.
- [62] Kong F, Li X, Wang H, et al. Land cover classification based on fused data from GF-1 and MODIS NDVI time series[J]. Remote Sensing, 2016, 8(9): 741-760.
- [63] Fang Y, Zhang H, Mao Q, et al. Land cover classification with gf-3 polarimetric synthetic aperture radar data by random forest classifier and fast super-pixel segmentation[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2014-2032.
- [64] 陈良富,尚华哲,范萌,等. 高分五号卫星大气参数探测综述[J]. 遥感学报,2021,25(9):1917-1931.
- [65] 叶函函,王先华,吴时超,等. 高分五号卫星 GMI 大气 CO₂ 反演方法[J]. 大气与环境光学学报,2021,16(3):231-238.
- [66] 张立福,赵晓阳,孙雪剑,等. 高分五号高光谱数据融合方法比较[J]. 遥感学报,2022,26(4):632-645.
- [67] Ren K, Sun W, Meng X, et al. Fusing China GF-5 hyperspectral data with GF-1, GF-2 and Sentinel-2A multispectral data: Which methods should be used? [J]. Remote Sensing, 2020, 12(5): 882-907.
- [68] 张素. “高分数据”替代 80% 的国外卫星数据[J]. 航天返回与遥感,2016,37(1):31.

【责任编辑:陈 钢】