

小滦河流域复杂地表碳循环遥感综合试验

穆西晗¹, 阎广建¹, 周红敏¹, 庞勇^{2,3}, 邱凤^{4,5}, 张乾^{4,5}, 张永光^{4,5}, 谢东辉¹, 周盈吉¹, 赵天杰⁶, 仲波⁶, 宋金玲¹, 孙睿¹, 蒋玲梅¹, 尹思阳¹, 李凡¹, 焦子锜¹, 屈永华¹, 张吴明^{7,8}, 程顺⁹, 崔同祥⁹

1. 北京师范大学 地理科学学部 遥感科学国家重点实验室 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 北京 100875;
2. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091;
3. 国家林业和草原局 林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091;
4. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210023;
5. 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023;
6. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100094;
7. 中山大学 测绘科学与技术学院, 珠海 519082;
8. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519080;
9. 河北省塞罕坝机械林场总场, 承德 068450

摘要: 遥感综合试验对于遥感科学技术的发展起到重要作用, 无论是基础研究还是遥感应用都需要试验提供支撑。从2018年开始, 遥感科学国家重点实验室针对遥感自身发展和遥感面向地表圈层深化应用面临的科学问题, 在滦河上游流域组织了小滦河流域复杂地表碳循环遥感综合观测试验, 本文旨在介绍该试验的目标、区域、观测参数、观测方法以及对未来研究的展望, 以期望为今后开展其他遥感试验及相关研究提供有益的参考和帮助。该试验采用星机地协同综合观测的方式, 选择主要的在轨运行卫星数据及覆盖此流域的遥感产品作为主要数据; 针对典型区域开展航空及无人机遥感试验, 搭载光学传感器设备, 获取典型区域水热循环、碳循环等关键参数; 并同步开展地面观测试验, 在典型实验区开展大气、植被和土壤关键参数的精细观测。目前已系统的开展了地面测量试验、无人机遥感试验及航空遥感试验, 并同步收集了卫星遥感数据, 形成了一套丰富的星—机—地配套遥感实测数据集。在试验的推动下, 遥感科学国家重点实验室于2020年在试验区架设了多座综合观测塔, 并配置了多种观测设备, 开启了长时间序列观测任务, 虚拟试验场的构建和机理生态模型的运行也在同步开展。小滦河流域复杂地表碳循环遥感综合试验利用星—机—地一体化的监测方法有效获取了地表水、能量和碳循环的关键参数, 为遥感机理模型发展、反演方法检验和尺度转换研究提供了关键的基础数据。目前已用来建立遥感机理模型的综合检验平台, 分析和改进传统模型和遥感产品在复杂地表的适用性, 阐明流域尺度碳水耦合的物理过程。

关键词: 遥感, 综合试验, 流域尺度, 碳循环, 小滦河, 塞罕坝

引用格式: 穆西晗, 阎广建, 周红敏, 庞勇, 邱凤, 张乾, 张永光, 谢东辉, 周盈吉, 赵天杰, 仲波, 宋金玲, 孙睿, 蒋玲梅, 尹思阳, 李凡, 焦子锜, 屈永华, 张吴明, 程顺, 崔同祥. 2021. 小滦河流域复杂地表碳循环遥感综合试验. 遥感学报, 25(4): 888-903

Mu X H, Yan G J, Zhou H M, Pang Y, Qiu F, Zhang Q, Zhang Y G, Xie D H, Zhou Y J, Zhao T J, Zhong B, Song J L, Sun R, Jiang L M, Yin S Y, Li F, Jiao Z T, Qu Y H, Zhang W M, Cheng S and Cui T X. 2021. Airborne comprehensive remote sensing experiment of forest and grass resources in Xiaoluan River Basin. National Remote Sensing Bulletin, 25(4): 888-903[DOI:10.11834/jrs.20210305]

收稿日期: 2020-08-03; 预印本: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(编号:41331171); 国家重大科学研究计划(编号:2015CB953700); 遥感科学国家重点实验室重大研究计划; 国家重点研发计划(编号:2018YFA0605503)

第一作者简介: 穆西晗, 1981年生, 男, 副教授, 研究方向为多角度植被遥感。E-mail: muxihan@bnu.edu.cn

通信作者简介: 阎广建, 1972年生, 男, 教授, 研究方向为定量遥感。E-mail: gjyan@bnu.edu.cn

1 引言

遥感机理模型是定量遥感的基础, 包括辐射传输模型、几何光学模型等不同的建模方式 (Liu 等, 2018)。但是复杂地表的电磁波信号传输机理复杂, 一直是定量遥感建模、反演和检验基础研究较少涉足的领域。由欧洲发起的辐射传输模型比较项目 RAMI-radiative transfer model intercomparison (Widlowski 等, 2013), 自1999年—2009年间共举办了4期, 所提供的各种虚拟植被场景和模拟数据已经成为国际遥感植被模型建模的经典, 有力地推动了遥感物理建模的发展, 特别是第4期构建的真实森林场景为基于虚拟实验的模型检验提供了重要数据基础, 但是该项目仍缺少实测数据作为模拟数据的对比交互, 而且所构建场景也没有充分体现复杂地表的实际状况。

中国在遥感基础理论研究和星—机—地同步试验方面的水平都已经走在了国际前沿, 近几年针对复杂地表的遥感研究有逐渐增加的趋势, 973项目“复杂地表遥感信息动态分析与建模”专门针对复杂地表研究机理建模、时空尺度转换及多模式综合反演问题, 建立了综合建模及反演的理论框架 (李增元等, 2019), 开展了复杂地表综合遥感试验 (Tian 等, 2015)。

遥感试验是独立检验遥感数据产品的过程。随着遥感观测数据和定量遥感产品的快速增长, 遥感产品相关的检验需求也显得更加重要 (Wu 等, 2019)。实际上在国内外所开展的较大规模综合性遥感试验可以分为两类, 一类是集中围绕遥感自身的模型、反演或产品检验开展的试验, 如 FIFE (Sellers 等, 1988), Bigfoot (Cohen 等, 1999), VALERI (Rossello 等, 2007), COMPLICATE (Tian 等, 2015); 另外一类并不限于对遥感产品精度的评估, 还包括通过遥感数据和产品驱动地球表面过程模型用于理解流域或区域尺度的地表过程, 如 BOREAS (Sellers 等, 1995), WATER (Li 等, 2009), HiWATER (Li 等, 2013) 等。第1类遥感试验主要关注遥感科学发展中的关键性基础问题, 如遥感机理模型发展和检验, 而第2类更多是通过包括遥感在内的多学科研究力量交叉推进生态、水文等复杂地表过程问题的解决。

植被作为生物圈的重要组成部分和生态系统

功能的主体, 植被的类型、数量以及质量的变化对地球生物化学循环与陆地生态系统的物质交换如水、碳、氮等都有着重要的影响, 在生物固碳、减缓全球变暖方面起着关键作用 (Crowther 等, 2015; Foley 等, 2000; Hansen 等, 2013)。全球陆地碳源汇的估算尚存在巨大的时空差异和不确定性 (IPCC, 2013; Xia 等, 2014), 对其精确计量迫切需要提高植被结构和生化参数等关键要素的估算精度 (Marvin 等, 2014)。遥感观测获得植被参数继而驱动陆地植被碳水过程模型, 可以提高对区域和全球尺度碳水平衡的理解和模拟水平。

2017年—2021年遥感科学国家重点实验室在滦河上游组织了小滦河流域遥感综合观测实验, 作为“滦河流域碳、水循环和能量平衡遥感综合试验”的重要组成部分, 以2018年为起始 (阎广建等, 2021), 在小滦河流域开展的遥感综合观测是其中的重要组成部分, 目前已完成了主要观测试验。该综合试验以流域尺度的生态系统为观测对象, 获取了地面测量数据、无人机测量数据以及航空遥感数据, 同时收集了与地面、无人机及航空测量数据配套的卫星遥感数据, 形成了一套系统的、丰富的多尺度观测数据集, 其目的在于促进遥感机理模型的发展, 提高遥感获取复杂地表关键参数的能力以及与过程模型结合以更好地阐明流域尺度碳水耦合物理过程。试验目标既包括推动解决遥感科学自身发展遇到的问题, 也涉及提升遥感对于地球系统相关模型的支撑能力。

为了解决以上问题和挑战, 小滦河流域遥感综合观测试验以2018年为起始, 立足于复杂地表, 采集多波段、主被动、星机地协同的综合观测数据, 为遥感机理模型发展、反演方法验证和尺度转换研究提供关键基础数据, 提高流域尺度碳水耦合过程的模拟能力。

2 试验区

小滦河是滦河上游的主要支流, 流经塞罕坝林场和御道口牧场, 处于典型的森林—草原过渡带、农牧交错带。流域内有进行大规模人工造林的塞罕坝机械林场, 树种和树龄组成相对简单, 平地 and 山地兼具, 非常适合作为定量遥感模型和算法检验的区域。同时小滦河流域的森林和草原为京津冀地区涵养水源、净化水质, 对于阻止浑

善达克沙地的南移起着重要作用,是守卫京津冀的重要屏障。在小滦河流域开展遥感综合试验,检验遥感模型和算法,综合研究当地生态系统中的碳水循环过程,对于京津冀生态涵养区生态环境保护 and 绿色发展有重要意义。

试验区包括森林试验区,农田草地试验区和复杂地形试验区(图1)。塞罕坝森林试验区覆盖塞罕坝机械林场的核心区域,地表类型为人工林地,树种包括落叶松、樟子松和白桦。御道口农田草地研究区主要包括御道口牧场的玉米和草地。复杂地形区观测试验主要集中在塞罕坝月亮山区域,该研究区为小滦河流域东缘,海拔跨度1278—1932 m,大部分坡面坡度在30°左右,主要地表覆

盖为草地(图2)。

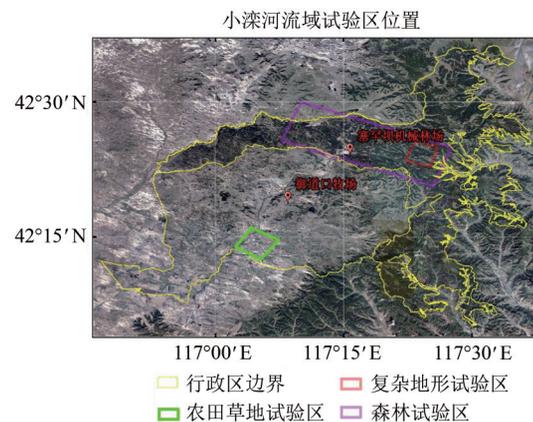


图1 小滦河流域试验区位置

Fig. 1 The Xiaoluan River Basin test area

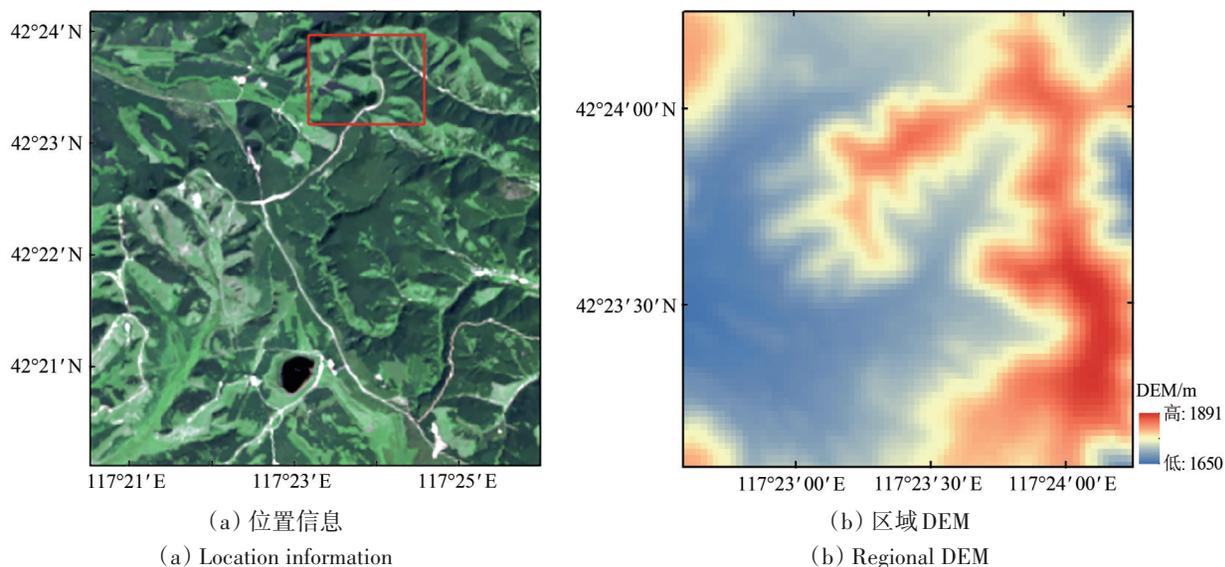


图2 布设站点的月亮山区域

Fig. 2 Moon Mountain area for observation stations

3 科学问题、试验目标及内容

3.1 拟解决的关键科学问题

目前叶片和冠层尺度上的碳水耦合机理过程相对较为明晰。但在景观或流域尺度上,碳循环和水循环过程的耦合过程还不清楚。小滦河流域碳水循环遥感综合试验拟解决的主要科学问题包括:

(1) 如何在复杂地表通过遥感手段有效获得地表碳循环关键参量,确定机理模型和遥感产品的适用性,进而改进提高模型的精度,是试验关注的首要问题。

(2) 如何通过天空地的综合观测,同时考虑

植被三维结构对冠层光合作用、降水截留和蒸散发的影响以及典型植被地表热状况变化过程,提高流域尺度碳水耦合过程的模拟,阐明流域尺度上碳水耦合的物理过程,是试验关注的核心问题。

3.2 总体试验目标

试验将以小滦河流域塞罕坝林场和御道口牧场为主要研究区,利用星—机—地一体化监测方法,开展以碳收支、遥感机理为主要研究对象的遥感综合观测试验,获得生态水文耦合模型的关键参量,同时考虑植被三维结构对冠层光合作用、降水截留和蒸散发的影响以及典型植被地表热状况变化过程,提高流域尺度碳水耦合过程的模拟

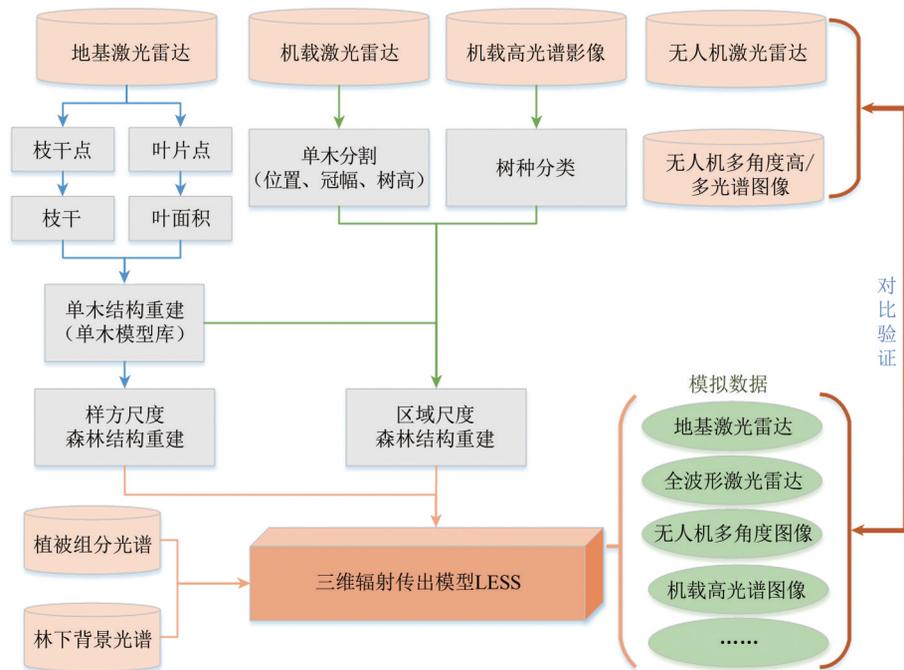


图4 虚拟试验场技术流程图

Fig. 4 Technical flow chart of virtual experimental platform

3.4 复杂地形区遥感观测试验

复杂地形区参数的遥感观测存在难度。试验针对复杂地形区地表辐射的遥感模型建立、云影响估算、时空尺度转换以及真实性检验,在设立的复杂地形试验区范围内不同坡度坡向利用长短波四分量辐射表组网观测,安装云天空成像仪测量高频次云覆盖和云高,测量直散射辐射,形成复杂地形区布样测量方法和时间连续的观测数据,分析地形和云对辐射的影响,并进一步建立复杂地形区的遥感机理模型、参数反演方法,发展真实性检验理论,为复杂地形区植被参数监测方法的发展和BEPS模型运行提供基础。同时复杂地形区也属于虚拟试验场建设的重要区域。

3.5 碳循环模型机理研究试验

目前叶片和冠层尺度上的碳水耦合机理过程相对较为明晰。但在景观或流域尺度上,碳循环和水循环过程的耦合过程还不明晰,这主要是缺乏流域尺度上系统一致的碳水循环关键参量的遥感及水文观测,尤其是光合作用、蒸散发和径流等的协同观测。通过天空地一体化综合观测获得碳水循环关键参量地面观测,为碳循环关键参量遥感反演提供地面验证;研究针对复杂地表通过

遥感手段有效获取碳水循环关键参数的方法,进而同时考虑植被三维结构对冠层光合作用、降水截留和蒸散发的影响以及典型植被地表热状况变化过程,提高流域尺度碳水耦合过程的模拟,阐明流域尺度上碳水耦合的物理过程。

模型选择机理性陆地生态模型 BEPS (Liu 等, 1997; Chen 等, 2007)。BEPS 模型顾及冠层内阳叶和阴叶在太阳辐射吸收、气孔导度和光合速率方面的差异,基于碳水耦合原理模拟光合作用和蒸腾速率,需要的主要关键参数有植被类型、叶面积指数 (LAI)、叶片最大羧化速率 (V_{cmax})、呼吸对温度的敏感性等参数以及气象数据等。

叶面积指数和聚集度指数 (CI) 是 BEPS 模型的重要输入参数,通过植被冠层结构及反射特性的观测,可为 LAI 和 CI 等结构参数遥感反演方法及验证提供地面验证,进一步提高遥感反演精度。叶片最大羧化速率 (V_{cmax}) 是植被光合作用模拟的关键参数,通过天空地一体化的观测,获取 V_{cmax} 及与植被光合作用相关的叶片叶绿素和氮含量等参数,阐明 V_{cmax} 与叶片叶绿素和氮含量等之间的关系,为构建 V_{cmax} 的遥感反演方法及地面验证提供数据。

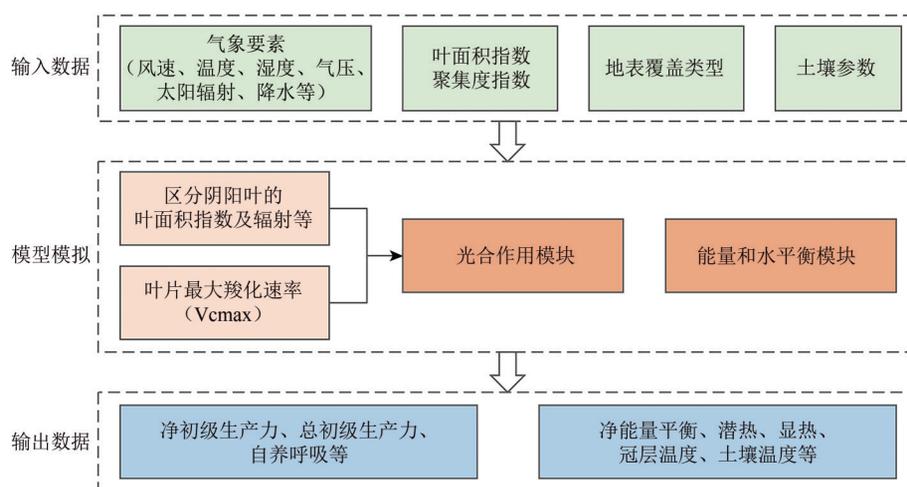


图5 BEPS模型框架图

Fig. 5 Framework of BEPS model

4 试验组成

4.1 地面测量

地面测量涉及地物光谱、植被参数、云和辐射参数、以及土壤温湿度等参数获取，主要用于辐射传输模型建模、产品验证和为碳水耦合模型提供输入。地面测量特色在于配套参数齐全，与卫星、飞机等形成多尺度联合观测，基本满足BEPS模型和LESS模型输入，以及不同尺度模型应用和产品验证需求。

4.1.1 地物光谱测量

地物光谱是研究地表辐射传输、参数反演的基本参数。综合试验分别在室内和室外对试验区典型地物进行光谱测量，室外测量目标包括土壤、树皮、城区路面等，室内测量目标主要为试验区优势树种樟子松和落叶松叶片。

光谱测量采用美国SVC公司生产的HR-024地物光谱仪。该光谱仪可以探测350—2500 nm波段范围内的信号，且在350—1000 nm的波长范围内光谱分辨率优于3.5 nm，在1000—1850 nm的波长范围内光谱分辨率优于9.5 nm，被广泛用于地物光谱测量。试验分别在2018-09-14—18和2019-08-28开展光谱测量试验，在晴朗天气条件下，分别采集了土壤、树皮、城区路面地物反射光谱。在室内测量了16组樟子松、19组落叶松和3组白桦叶片的反射及透射光谱。阔叶光谱采用地物光谱仪(ASD FieldSpec4)与积分球(ASD RTS-3ZC)结合的方法测量叶片方向半球反射率。对于针叶使

用特定的叶片夹将针叶固定并置于积分球端口再进行光谱测量(Harron, 2000; Zhang等, 2008)。光谱测量原始值为辐亮度，叶片的反射及透射光谱的计算分别如式(1)和式(2)所示：

$$f = \frac{f_{\gamma} \cdot (DN - DC)}{(DN_{\gamma} - DC)} \quad (1)$$

式中， f 为叶片反射率， f_{γ} 为积分球参考板反射率， DN 为叶片反射的辐亮度， DC 为噪声的辐亮度， DN_{γ} 为参考板的辐亮度。

$$t = \frac{f_{\gamma} \cdot DN}{DN_{\gamma}} \quad (2)$$

式中， t 为叶片透过率、 f_{γ} 为积分球参考板反射率， DN 为叶片透过的辐亮度、 DN_{γ} 为参考板的辐亮度。

4.1.2 植被参数测量

植被结构参数表征了植被特征和生长状况，是影响植被对入射辐射吸收、反射、透射的关键因素，准确全面的植被结构参数测量，对植被辐射传输模型发展、植被参数和生物量估计以及产品验证具有重要意义。试验对研究区森林植被进行了广泛的调查，包括样地信息调查、植被结构参数测量和植被理化参数测量等。

(1) 样地信息调查。2018-07-24—28期间对森林样地进行了样地信息调查，在2个白桦林样地、10个樟子松样地、9个落叶松样地，测量每个样地内所有树木的树高、胸径参数、样地中心位置和优势树种。一方面，估算得到样地尺度平均冠高、树间距、最大冠高，并结合树高、胸径数据和异速生长方程，分树种类型估算各样地森林

地上生物量；另一方面，按照3个径级，每径阶选取3株标准木，每株标准木在胸径处（1.3 m）双侧钻取树芯，共钻取189组树芯，在实验室用年轮分析仪器确定各年份位置，获取年轮宽度数据，进而获取样地逐年植被生物量的变化。

同时基于Riegl VZ-1000地基激光雷达系统分别对单木和样地进行了扫描，获取不同树种的树木三维点云数据，提取样地基本信息并满足不同尺度三维森林场景构建需求。Riegl VZ-1000地基激光雷达系统发射激光脉冲并记录返回脉冲的时间来确定系统与目标对象之间的距离，同时系统在二维平面上旋转，激光棱镜在垂直方向转动来实现整个场景的扫描（郭庆华等，2018；习晓环等，2012），最小测距2.5 m，最大测距1200 m，测距精度5 mm。地基激光雷达数据获取采用中心及四角布站的方式进行（图6）。为实现5站数据的拼接，样地被设置约20个靶标片。数据采集使用的角度分辨率为 0.06° ，完成一站扫描需要约3 min。图7展示了1个样地的扫描数据。

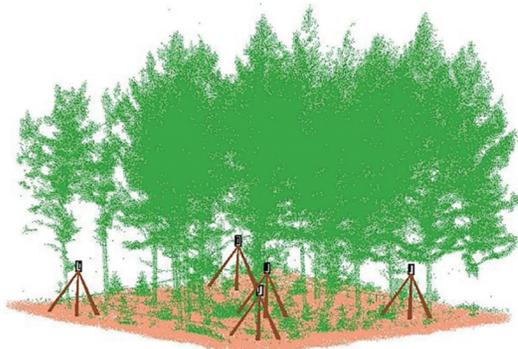


图6 地基激光雷达系统设站位置图
Fig. 6 Location map of terrestrial LiDAR system

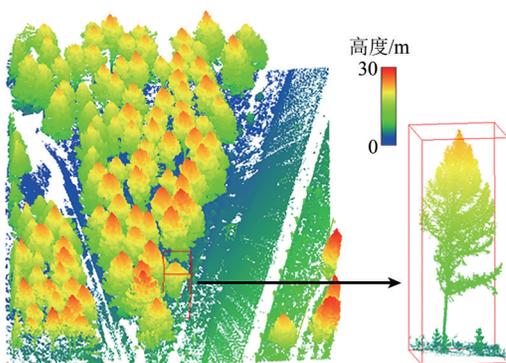


图7 地基激光雷达数据
Fig. 7 Terrestrial LiDAR data

(2) 植被结构参数测量。获取了试验区LAI、CI、植被覆盖度(FVC)等植被结构参数观测数据。LAI测量在30个森林样方进行，包括樟子松、落叶松、白桦林和混交林。测量仪器包括：LAI2000、TRAC、鱼眼相机和LAINet。LAI2000主要在漫射光环境下，最好是在阴天的时候和早晨或下午太阳高度角比较小的时候进行观测。测量时，在每个样方内取5个点（采用十字形布点方案），测量每个点的冠层LAI，用5个点的平均值代表样方的值。同时在每个采样点用鱼眼相机对着冠层和林下植被拍摄照片，用CAN_EYE软件处理鱼眼照片提取林上和林下LAI。

同时，从2018年5月开始，在塞罕坝林场针叶林林区部署了5台LAINet设备，获取了时间序列LAI数据，配合物候相机观测的图像，可以连续地观测到研究区的叶面积指数动态变化过程（图8所示数据时间从5月到8月）。

表1 LAI2000和TRAC使用说明

Table 1 Instructions for using LAI2000 and TRAC

仪器	观测方向		观测光照条件
	天顶角	方位角	
LAI2000	$0^\circ-74^\circ$	取决于视野帽的选择	漫射光
TRAC	垂直于太阳照射方向		直射光

LAI和CI同步测量主要在尚海纪念林及GLAS星载传感器脚印附近进行，所用仪器为TRAC。与LAI2000相反，TRAC观测在直射光条件下进行。根据TRAC测量规范，在垂直太阳入射方向每30 min进行一次采样，通过多次采样获取样地的LAI和CI。尚海纪念林以针叶林为主，阔叶林和混交林较少。地面观测CI大多分布在0.5—0.8，阔叶林最高，其次是混交林和针叶林，基本符合现有CI数据的统计规律（图9）。此次观测获取的数据将用于对中分辨率成像光谱仪MODIS CI和地球科学激光测高系统GLAS CI的分析和验证。

时间序列FVC测量在2018-05-09和2019-05-07期间开展，月观测1次。在试验区内设计15个样方，包含落叶松、白桦、樟子松、草地、灌木、湿地、土豆、玉米等不同每植被类型。测量在阴天或者一天的早晚太阳造成阴影效应不强烈的时候进行，以尽可能避免阴影的干扰，测量包括以下几个步骤：

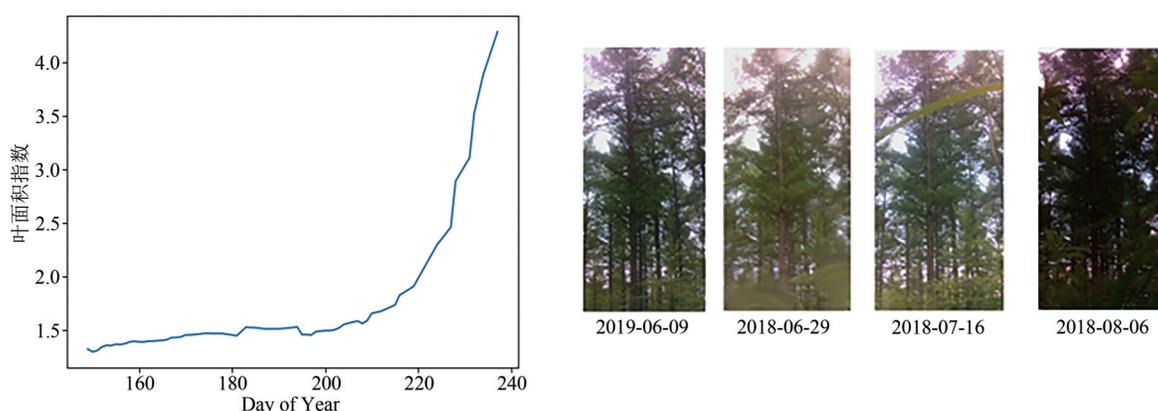
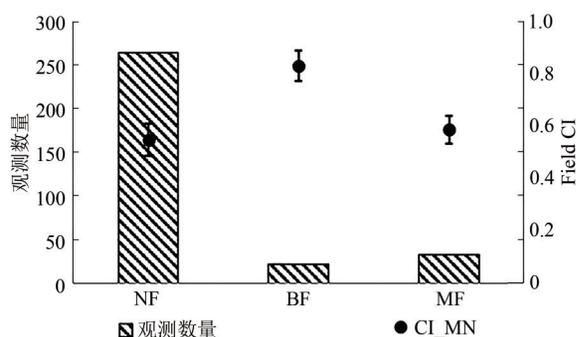


图8 针叶林叶面积指数时间序列变化(2019-05-29—08-25)以及部分时间点照片

Fig8 Time series leaf area index of coniferous forest (May 29—August 25, 2019) and sample photos

图9 尚海纪念林观测区观测数据植被类型和CI分布
Fig. 9 Vegetation types and CI distribution in Shanghai Memorial Forest observation area

(1) 根据光线条件调整相机焦距、光圈、感光度等参数, 固定相机参数, 在高度 1.3 m 处, 手持相机, 保持镜头与水平面保持平行, 获取清晰数码照片。在林地样方分别向上和向下拍摄, 在非林地样方只向下拍摄;

(2) 在正方形样方内采用对角线法均匀步长拍摄若干张照片。同时竖直向上或者向下拍摄, 并进行记录;

(3) 用 SHAR-LABFVC 算法 (Song 等, 2015) 处理向下拍摄的照片, 计算每张照片中绿色植被像素所占比例, 取样方内该比例的平均值作为该样方的 FVC_{down} 。用蓝色通道一大津法 (Otsu, 1979) 处理向上拍摄的照片, 计算每张照片中绿色植被像素所占比例, 取样方内该比例的平均值作为样方的 FVC_{up} 。根据式 (3) 计算非林地样方 FVC, 根据式 (4) 计算林地样方 FVC。

$$FVC = FVC_{down} \quad (3)$$

$$FVC = FVC_{up} + (1 - FVC_{up}) \times FVC_{down} \quad (4)$$

(3) 理化参数测量。植被理化参数测量主要

包括与植被光合作用相关的叶片叶绿素含量、氮含量、 V_{cmax} 等参数测量。在试验区选取 3 种典型森林树种 (樟子松、落叶松和白桦) 样方, 每个样方大小至少 300 m×300 m。利用高空作业车对冠层上中下 3 层叶片进行采样观测, 主要包括叶绿素和类胡萝卜素等色素含量、水分和干物质含量、氮含量、 V_{cmax} 等参数。首先在高空作业车上测量活体叶片的二氧化碳吸收曲线, 用于计算 V_{cmax} , 然后将测量后的叶片及同枝上的其他叶片采下带回实验室进行后续叶片光谱和理化参数测量。叶片叶绿素等色素通过研磨萃取用分光光度测量计算得到, 同时也用叶绿素仪 SPAD-502 (阔叶) 和 CCM-300 (针叶) 测量了叶绿素含量, 氮含量用杜马斯燃烧法测得。

4.1.3 云和辐射参数测量

辐射观测试验主要集中在塞罕坝月亮山区域。2018 年夏季至今, 试验区布设了 7 套地表辐射四分量测量仪, 一套总辐射与直射辐射测量仪, 与两套全天空成像仪。系统地进行了辐射与云覆盖情况的测量, 并得到了附近 2 km 区域的地表辐射四分量与云覆盖的数据。

为了能更加合理地在 2 km 区域内布置站点, 提前对该区域场景进行了模拟, 去除掉不能布置站点的区域后, 选出为了保证日出日落时刻都能有站点运行时必须布设站点的区域。最后, 利用蒙特卡洛法随机模拟不同站点的布设位置, 得到最优布站方案。利用该方案布设的站点可以通过加权的形式得到 2 km 范围内的区域辐射值, 同时利用其余站点对站点 1—4 的结果进行交叉验证, 发现这种模拟和实测结合的布站方案能很好地给

出复杂地形山区的辐射分布情况 (Yan 等, 2020)。

四分量辐射计分别布设在山顶、山谷以及3个坡面, 坡向分别为东、西、南, 所有仪器下垫面均为高度较矮的草地。辐射测量的传感器架设高度大约2 m, 支架上安装的 CNR4 传感器 (荷兰 Kipp & Zonen 公司) 与 MR60 传感器 (日本 EKO 公司) 在使用前均进行了标定。为了能测量到能代表不同坡面的真实辐射情况, 本次布设仪器时, 四分量辐射计测量角度全部都与坡面平行。山顶与山谷的辐射计平行于地面, 3个坡面的辐射计平行于坡面, 架设坡度接近 30° (图10)。试验获取了每分钟1次的上下行短波、长波数据集, 可用于全天候复杂地形短波辐射模型的验证分析 (图11)。

同时在承德塞罕坝月亮山山顶观测站的房顶上放置 RMR100 太阳辐射测量仪, 获取每分钟一次的总辐射、直射辐射、散射辐射、太阳方位角、高度角、日照时长等数据 (图12)。

用全天空成像仪 (SRF-02) 对云况进行实时观测, 记录白天每分钟一次的全天空云况照片,

监测天气和云况变化 (图13)。



图10 山地辐射观测的仪器架设方式与站点周围情况
Fig. 10 Instrument installation for radiation observation in mountainous area and the situation around the station

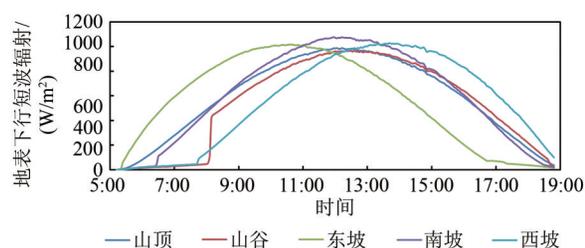
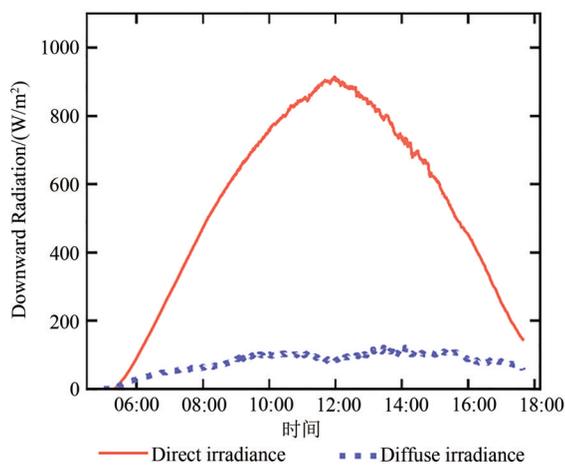


图11 晴空山地5个站点的短波下行辐射观测结果
Fig. 11 Observation results of downwards shortwave radiation at five stations in mountain under clear sky condition



(a) RMR100 太阳辐射测量仪
(a) RMR100 solar radiation meter



(b) 晴空直散射辐射观测数据示例
(b) Example of direct and diffuse radiation in clear sky

图12 太阳辐射测量装置及数据

Fig. 12 Solar radiation meter and observation data

4.1.4 土壤温湿度测量

土壤温湿度连续自动观测网络由29个站点, 30台土壤温湿度自动采集仪组成。基于主动微波像元尺度确定主动微波像元内土壤温湿度观测范围为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 包含12个点位 (以A (Active) 开

头命名); 基于被动微波像元尺度确定被动微波像元内土壤温湿度观测范围为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 包含17个点位 (以P (Passive) 开头命名)。被动微波像元尺度中有1个点位 (P5) 也同时属于主动微波像元尺度内的土壤温湿度观测点, 埋设了两台数据采

集器。每个站点都配备了SoilNet土壤温湿度数据采集器, 主动微波像元内的站点采用SoilNet土壤温湿度传感器测量土壤温度和土壤水分, 被动微波

像元内的站点采用5TM传感器测量土壤温度和土壤水分。所有站点以30 min 每次的频率观测5 cm, 10 cm 深度土壤温度和土壤水分(体积含水量)。

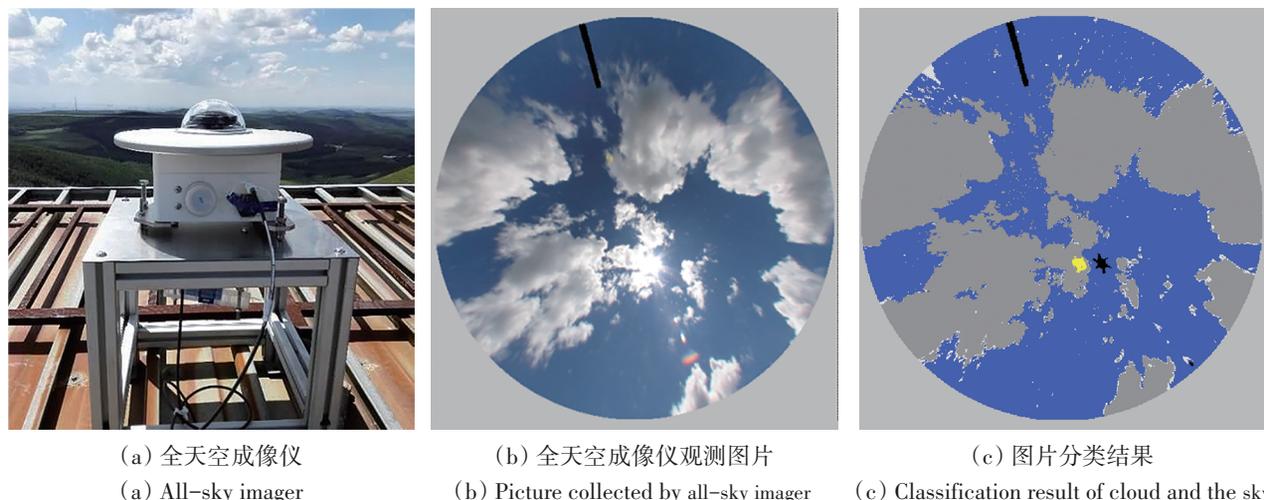


图13 全天空成像仪工作情况与采集到的图片(云覆盖度为48%)

Fig. 13 The working condition of the all-sky imager and the collected pictures (cloud coverage of 48%)

试验中利用烘干法测量的体积含水量对传感器进行标定。标定数据集的野外土样采用体积为100毫升的环刀水平取土, 环刀直径为5 cm, 取土过程中环刀中心对应土壤温湿度传感器的埋设深度(5 cm, 10 cm)。环刀取土的同时读取土壤温湿度传感器观测的土壤介电常数, 并利用Topp公式将介电常数转换为体积含水量。建立烘干法与传感器的土壤体积含水量之间的线性关系, 对塞罕坝土壤温湿度观测网观测的土壤水分进行系统性误差标定。

图14为A5站点2018年—2019年土壤水分数据, 可以看出测量结果反映了土壤冻融过程(2018-08-28—2019-08-08)、降水事件以及蒸发等过程引起的土壤中液态水分的时序变化。

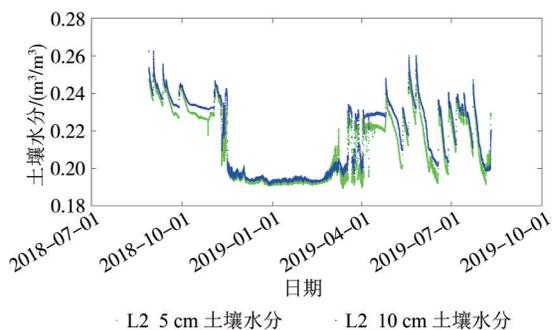


图14 2018-08-28—2019-08-08 A5站点标定后土壤水分数据

Fig. 14 The calibrated soil moisture data of A5 station from Aug. 28, 2018 to Aug. 08, 2019

4.2 无人机遥感试验

无人机观测是本流域试验的特色之一, 在本次试验中, 无人机被用于样方尺度森林冠层的多角度高光谱反射率、激光雷达信号和植被覆盖度信息获取, 是森林植被观测的重要手段。

4.2.1 无人机多角度反射率观测

以塞罕坝机械林场樟子松林、落叶松林、白桦林和闪电河流域的土豆、玉米为研究对象, 利用无人机高光谱成像系统获取植被冠层天顶和主平面多角度光谱反射率数据(Zhang等, 2020)。无人机高光谱成像系统所用无人机为挂载增稳云台的六旋翼无人机M600 Pro, 云台上搭载由四川双利合谱科技有限公司自主研发的高光谱成像仪GaiaSky-mini2-VN, 光谱分辨率为3.5 nm, 镜头扫描视场为27.3°, 光谱范围从388.9—1016.5 nm (726个通道), 扫描方式为悬停推扫。在5月—9月整个生长季, 利用无人机高光谱成像平台对样地进行多次观测。天顶观测飞行高度300 m, 沿航向前进一定距离后悬停采集影像, 保证航向和旁向重复率不小于50%, 便于影像拼接。垂直向下观测时, 所拍摄的高光谱影像空间分辨率约为0.16 m, 幅宽约为140 m。多角度观测以主平面为航向, 首先拍摄热点影像, 然后以此为航向, 飞至暗点处调头拍摄, 随后沿主平面拍摄60°、40°、30°、0°等角度及相对称的角度的影像, 如图15所示。

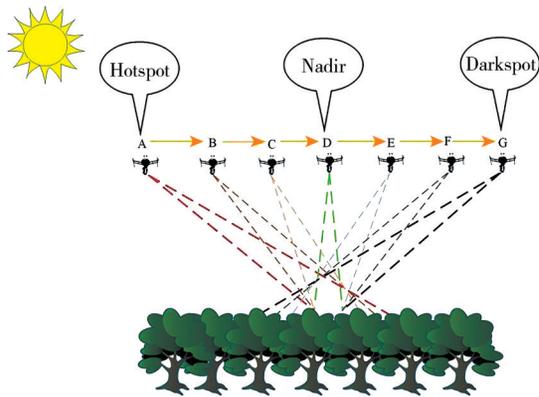


图15 无人机多角度观测示意图

Fig. 15 Schematic diagram of UAV-based multi-angle observation

通过成像时在地面铺设的标准灰板，计算地物的反射率：

$$R_{\text{target}} = \frac{DN_{\text{target}}}{DN_{\text{grey}}} \cdot R_{\text{grey}} \quad (5)$$

式中， DN_{target} 和 DN_{grey} 分别为高光谱成像仪获取的地物和灰板的DN值， R_{grey} 为灰板实测的反射率。对获取的影像进行几何校正后，利用ENVI软件中FLAASH模块进行大气校正，即可得到准确的反射率数据。

4.2.2 无人机植被覆盖度观测

区域尺度植被覆盖度观测于2018年5月—9月，2019年5月—7月期间每月观测1次。在试验区内布设了15个样方，每个样方大小为30 m×30 m，包含落叶松、白桦、樟子松、草地、灌木、湿地、土豆、玉米等不同植被类型。无人机FVC数据获取包括以下几个步骤：

(1) 在无人机（大疆M600）上搭载可以固定焦距设置的数码相机（SONY ILCE-QX1），在采样点上方悬停，确保数码照片的地面分辨率小于0.05m/pixel。采用“之”字形航线，航向重叠率为90%、旁向重叠率为70%，在指定航点悬停拍照。

(2) 通过运动恢复结构方法SfM（Structure from Motion）（Ullman, 1979），在Agisoft Photoscan图像处理软件中构建样方尺度的SfM点云。

对于低矮植被样方只通过数码相片获取样方整体覆盖度（Li等，2018），对于森林样方会综合利用数码相片提取的颜色和三维信息获取上下分层覆盖度（Li等，2020）。

4.2.3 无人机激光雷达观测

区域尺度森林场景扫描由Rigel miniVUX-1 UAV无人机激光雷达观测系统完成。该系统由搭载于大疆M600无人机平台的Rigel miniVUX-1 UAV扫描仪和定位定向系统组成。相较于地基激光雷达系统，无人机激光雷达系统通过定位定向系统实时获取平台的绝对位置信息，因此可实现快速大场景扫描（Cao等，2019）。图16和表2介绍了Rigel miniVUX-1 UAV无人机激光雷达系统的基本信息。数据采集时无人机飞行高度为50 m，航速5 m/s，激光雷达扫描速度为45行/s，扫描视场范围为90°—270°。无人机激光雷达测量在3个样地进行，包括落叶松、樟子松和白桦3个树种。每个样地覆盖5条航带，航带间距40 m，作业时间约4 min（图17）。图18展示了1个样地的无人机激光雷达数据。



图16 Rigel miniVUX-1 UAV无人机激光雷达系统
Fig. 16 UAV LiDAR system of Rigel miniVUX-1 UAV

表2 Rigel miniVUX-1 UAV参数

Table 2 Parameters of Rigel miniVUX-1 UAV

指标	参数
最大测距	250 m
扫描视场角	360°
扫描速度	3 lines/s—120 lines/s
扫描频率	100 kHz
测距精度	15 mm
定位精度	H—0.01 m/ V—0.02 m
定位速度	H—0.02 m/s/ V—0.01 m/s

4.3 航空遥感试验

选用小松鼠直升机作为航空飞行平台，飞行面积约400 km²，预计飞行时间25 h。飞行设计航

高相对航高 800—1000 m, 航速约 160 km/h (测区地面平均高程 250 m)。



图 17 无人机激光雷达系统飞行航线图

Fig. 17 Flight route diagram of UAV LiDAR system

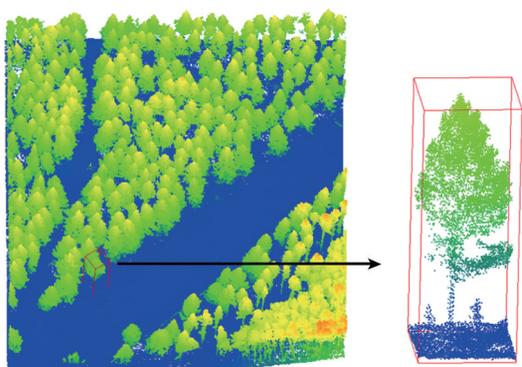


图 18 无人机激光雷达数据

Fig. 18 UAV LiDAR data

中国林业科学研究院 LiCHy 系统集成了高精度波形激光雷达、高分辨率航空数码相机、高光谱成像装置和高精度的导航及姿态测量系统 (Pang 等, 2016), 通过这些设备的有机集成, 实现对被测树木的光谱和三维空间属性信息的高效测量 (图 19, 表 3)。

激光雷达机载方案:

(1) 依据激光雷达传感器性能, 飞行高度不超过 1000 m, 点密度 ≥ 4 个点/ m^2 , 扫描角设置不宜过大 ($\leq \pm 30^\circ$) 以避免由于大扫描角无法消除由于地形和林冠高差带来的数据采样不完整, 进而影响森林结构参数定量反演精度;

(2) 对于同一个测区, 采用“航线正交多次覆盖” (至少 2 次覆盖) 的飞行和数据获取方式, 便于获取完整的森林采样数据, 有利于进行森林

“乔—灌—草”层次结构定量分离, 为准确模拟森林生态系统碳水循环过程提供可靠数据;

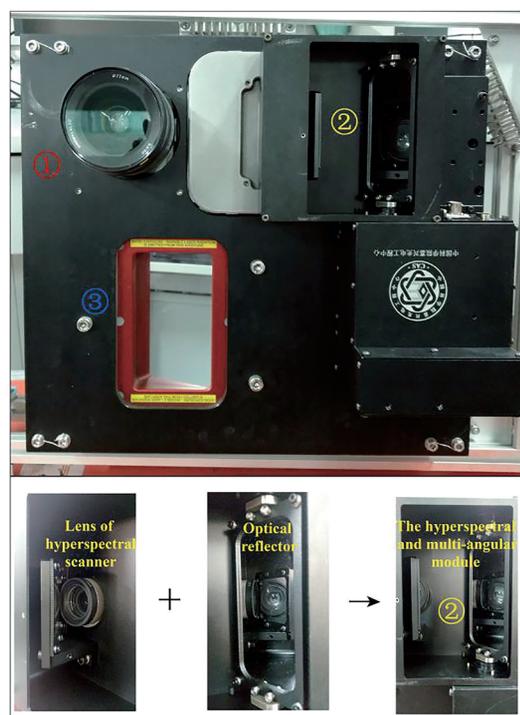


图 19 中国林业科学研究院 LiCHy 集成传感器

Fig. 19 Integrated sensors of LiCHy system from Chinese Academy of Forestry Sciences

(3) 飞行区域尽量覆盖不同植被类型的区域, 有利于满足不同研究关注点和交叉学科的需求。在保证类型的前提下可以尽量大的覆盖流域范围, 为提供高精度的 DEM 做准备。

小滦河流域面向流域内的碳循环关键参数时空变化特征问题, 通过有人机平台, 获取植被生长阶段关键时期的可见光、红外激光雷达数据。有人机同时搭载高光谱、CCD 相机、激光雷达等设备, 面向 10 km 级尺度飞行观测 (图 20、图 21), 在 8 月底和 9 月开展多次飞行 (表 4) (Pang 等, 2021)。

4.4 卫星遥感

本次试验分为夏季和冬季两个季节从中国资源卫星应用中心、ESA 和 USGS 收集了共 5 颗卫星 (GF-1、GF-2、Sentinel-2A、Sentinel-2B 和 Landsat 8) 11 个传感器 (4 个 WFV、4 个 PMS、2 个 MSI 和 1 个 OLI) 的 2622 景数据 (数据总存储量超过 1TB), 空间分辨率从 2 m (全色) 到 30 m, 10—30 m 数据一起可以对整个试验区形成 10 天一次观测。夏季和冬季收集到的数据列表如表 5 和表 6 所示。同时

购买了2018年10月份WorldView-3全色和多光谱的数据,全色波段星下点分辨率0.31 m(图22)。后续将以此为基础生产区域性遥感参数产品,用地面观测和航空数据进行检验,为流域尺度过程模型计算提供输入。

表3 LiCHy系统技术指标

Table 3 Technical specifications of LiCHy system

参数	数值
激光雷达: Riegl LMS-Q680i	
波长	1550 nm
发射脉冲宽度	3 ns
最大重频	400 kHz
波形采样间隔	1 ns
脉冲发散角	0.5 mrad
扫描角范围	±30°
最大扫描速率	200 lines/s
点云密度@1000m	2.4 pts/m ²
测距精度	0.02 m
CCD相机: DigiCAM-H60	
像元	8956×6708
传感器尺寸	40.30 mm×53.78 mm
传感单元尺寸	6 μm
辐射分辨率	16 bits
焦距	50 mm
高光谱: AISA EagleII	
光谱范围	400—970 nm
焦距	18.1 mm
视场角	37.7°
扫描速率	160 lines/s
多角度观测范围	5—55°
空间像元数	1024
光谱分辨率	3.3 nm
最大波段数	488
量化比特数	12 bits
IFOV	0.037°

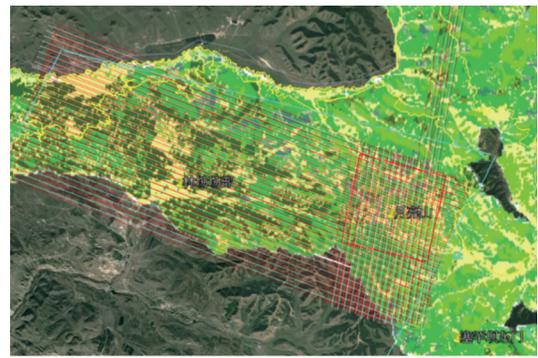


图21 小滦河上游飞行航线

Fig. 21 Flight lines in the upper reaches of Xiaoluan River

表4 小滦河流域LiCHy飞行架次安排

Table 4 Arrangement of sorties with LiCHy system in Xiaoluan River Basin

机型	飞行时间	载荷	飞行地点	地表类型
有人机	2018年8—9月	CCD、高光谱、激光雷达	塞罕坝林区、御道口农草区	森林为主,兼顾灌木、草地、农田

表5 夏季试验期(2018-06-09)数据收集情况列表

Table 5 List of data collection in summer (June—September 2018)

序号	卫星	传感器	分辨率	景数	数据量/GB
1	GF-1	WV1—4	16 m	94	47
		PMS1—2	2 m/8 m	107	54
2	GF-2	PMS1—2	1 m/4 m	100	50
3	Sentinel-2A/B	MSI	10 m	778	389
4	Landsat-8	OLI	30 m	97	49
5		合计		1176	589

表6 冬季试验期(2018-11-2019-02)数据收集情况列表

数据收集情况列表

Table 6 List of data collection in winter (November 2018—February 2019)

序号	卫星	传感器	分辨率	景数	数据量
1	GF-1	WV1—4	16 m	67	34
		PMS1—2	2 m/8 m	89	45
2	GF-2	PMS1—2	1 m/4 m	103	52
3	Sentinel-2A/B	MSI	10 m	1077	539
4	Landsat-8	OLI	30 m	110	55
5		合计		1446	724

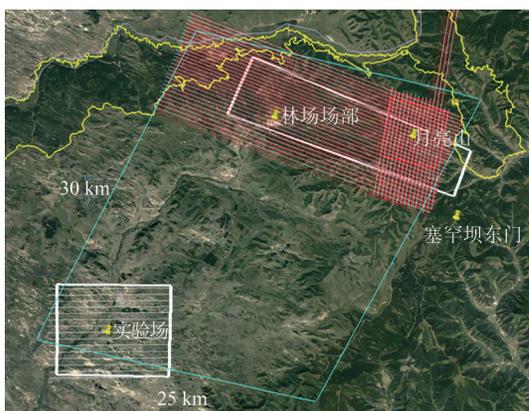


图20 小滦河流域飞行航线

Fig. 20 Flight lines of Xiaoluan River Basin



图22 复杂地形试验区0.3 m分辨率WorldView-3彩色合成图

Fig. 22 0.3 m resolution WorldView-3 true color image over the mountainous area in the study region

5 结 语

小滦河流域复杂地表碳循环遥感综合试验关注遥感在复杂地表碳循环过程中所起的作用,以塞罕坝森林为主要观测对象,推动在复杂林地植被和地形条件下的遥感模型、算法产品改进,推动遥感与描述流域尺度的碳循环过程模型的结合。

2018年以来获取航空和地面测量数据超过2 TB,针对复杂地表碳循环研究的小滦河遥感综合试验目前还在进行中。按照试验设计,2018年为机载和地面测量的主要年度,获取了机载激光雷达数据和机载CCD影像、高光谱影像等数据,在典型样地采集了地物光谱信息,测量了关键植被结构参数和辅助信息,同时获取了长时间序列的复杂地形区辐射四分量、云覆盖和流域内土壤温、湿度数据;2019年开展无人机和地面补充测量,获取了较为完整的无人机遥感观测数据集,主要包括多个典型样地的多角度高光谱影像、植被覆盖以及激光雷达数据等;2020年已架设观测塔启动长时间序列综合观测,下一步最重要的工作是虚拟试验场构建和流域尺度机理生态模型BEPS的运行。

三维辐射传输模型LESS基于光线追踪算法,充分考虑了植被精细三维结构及内部组分之间的多次散射,可以更准确的模拟多种遥感信号,包括多/高光谱影像、BRF (Bidirectional Reflectance Factor)、激光雷达等。因此,可以部分代替野外

实测数据,用于遥感机理模型的验证与分析。为了进一步提高计算效率,已将LESS模型单机版(<http://lessrt.org/> [2021-03-05])集成到“遥感模型集成与多波段遥感数据联合模拟平台”并对外开放(<http://mirs.bnu.edu.cn:8080/> [2021-03-05])。

经过多方的共同努力,2020年夏季在塞罕坝林场典型树种分布区域建成3座40 m综合观测塔,架设涡动仪、植被荧光光谱仪、四分量辐射计、自动气象站等观测设备,在复杂地形区的自动观测站点增加植被覆盖度、光合有效辐射测量的传感器,形成了对于虚拟试验场建设和BEPS模型运行的支撑条件。

志 谢 感谢塞罕坝机械林场总场和千层板分场对小滦河流域遥感综合试验和科研观测塔建设工作的大力支持,感谢北京大学塞罕坝生态站的后勤保障和河北省气象局对于试验数据的提供。最后,试验的顺利进行离不开北京师范大学、南京大学、北京大学、中国林业科学研究院、中国科学院空天信息创新研究院、中国科学院地理科学与资源环境研究所等高校和科研院所的众多老师和学生的参与和支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Cao L, Liu K, Shen X, Wu X and Liu H. 2019. Estimation of forest structural parameters using UAV-LiDAR data and a Process-Based model in ginkgo planted forests. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12 (11): 4175-4190
- Chen X F, Chen J M, An S Q and Ju W M. 2007. Effects of topography on simulated net primary productivity at landscape scale. *J Environ Manage*, 85(3): 585-96
- Cohen W B and Justice C O. 1999. Validating MODIS terrestrial ecology products: Linking in situ and satellite measurements. *Remote Sensing of Environment*, 70(1): 1-3
- Crowther T W, Glick H B, Covey K R, Bettigole C, Maynard D S, Thomas S M, Smith J R, Hintler G, Duguid M C, Amatulli G, Tuanmu M-N, Salas W, Jetz C, Stam C, Piotta D, Tavani R, Green S, Bruce G, Williams S J, Wisser S K, Huber M O, Hengeveld G M, Nabuurs G-J, Tikhonova E, Borchardt P, Li C-F, Powrie L W, Fischer M, Hemp A, Homeier J, Cho P, Vibrans A C, Umunay P M, Piao S L, Rowe C W, Ashton M S, Crane P R & Bradford M A. 2015. Mapping tree density at a global scale. *Nature*. 525: 201-205
- Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Pren-

- tice I C, Ramankutty N and Snyder P K. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309(5734): 570-574
- Guo Q H, Su Y J, Hu T Y and Liu J. 2018. LiDAR forest ecological applications: theory, method and examples. Beijing: Higher Education Press (郭庆华, 苏艳军, 胡天宇, 刘瑾. 2018. 激光雷达森林生态应用——理论、方法及实例. 北京: 高等教育出版社)
- Hansen M C, Potapov P V, Moore R, Hancher M, Turubanova S A, Tyukavina A, Thau D, Stehman S V, Goetz S J, Loveland T R, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice C O and Townshend J R G. 2013. High-Resolution global maps of 21st-Century forest cover change. *Science*, 342(6160): 850-853
- Harron J. 2000. Optical Properties of Phytoelements in Conifers. In, Graduate Programme in Earth and Space Science. North York, Ontario, Canada: York University
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Liu J, Chen J M, Cihlar J and Park W M. 1997. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*. 62(2): 158-175
- Li L, Chen J, Mu X, Li W, Yan G, Xie D and Zhang W. 2020. Quantifying understory and overstory vegetation cover using UAV-Based RGB imagery in forest plantation. *Remote Sensing*, 12(2): 298
- Li L, Mu X, Macfarlane C, Song W, Chen J, Yan K and Yan G. 2018. A half-Gaussian fitting method for estimating fractional vegetation cover of corn crops using unmanned aerial vehicle images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262: 379-390
- Li X, Cheng G, Liu S, Xiao Q, Ma M, Jin R, Che T, Liu Q, Wang W, Qi Y, Wen J, Li H, Zhu G, Guo J, Ran Y, Wang S, Zhu Z, Zhou J, Hu X and Xu Z. 2013. Heihe watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8): 1145-1160
- Li X, Li X, Li Z, Ma M, Wang J, Xiao Q, Liu Q, Che T, Chen E, Yan G, Hu Z, Zhang L, Chu R, Su P, Liu Q, Liu S, Wang J, Niu Z, Chen Y, Jin R, Wang W, Ran Y, Xin X and Ren H. 2009. Watershed allied telemetry experimental research. *Journal of Geophysical Research*, 114(D22)
- Li Z Y, Liu Q H, Yan G J, Wang J D, Niu Z, Jiang L M and Chen E X. 2019. Quantitative remote sensing model and inversion in complex surface. Beijing: Science press (李增元, 柳钦火, 阎广建, 王锦地, 牛铮, 蒋玲梅, 陈尔学. 2019. 复杂地表定量遥感模型与反演. 北京: 科学出版社)
- Liu Q, Yan G, Jiao Z, Xiao Q, Wen J, Liang S, Wang J, Schaaf C and Strahler A. 2018. From Geometric-Optical remote sensing modeling to quantitative remote sensing science—in memory of academician xiaowen li. *Remote Sensing*, 10(11): 1764
- Marvin D C, Asner G P, Knapp D E, Anderson C B, Martin R E, Sinca F and Tupayachi R. 2014. Amazonian landscapes and the bias in field studies of forest structure and biomass. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(48): E5224-E5232
- Otsu N. 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62-66
- Pang Y, Li Z Y, Ju H B, Lu H, Jia W, Si L, Guo Y, Liu Q W, Li S M, Liu L X, Xie B B, Tan B X and Dian Y Y. 2016. LiCHy: The CAF's LiDAR, CCD and hyperspectral integrated airborne observation system. *Remote Sensing*, 8(5): 398 [DOI: 10.3390/rs8050398]
- Pang Y, Liang X J, Jia W, Si L, Yan G J and Shi J C. 2021. The comprehensive airborne remote sensing experiment in Saihanba forest farm. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(4): 904-917 (庞勇, 梁晓军, 英文, 斯林, 阎广建, 施建成. 2021. 塞罕坝林场机载综合遥感实验. *遥感学报*, 25(4): 904-917) [DOI: 10.11834/jrs.20210222]
- Qi J, Xie D, Yin T, Yan G, Gastellu-Etchegorry J, Li L, Zhang W, Mu X and Norford L K. 2019. LESS: Large-Scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes. *Remote Sensing of Environment*, 221: 695-706
- Rossello P and Baret F. 2007. VALidation of Land European Remote Sensing Instruments. INRA, Davos.
- Sellers P J, Hall F G, Asrar G, Strebel D E and Murphy R E. 1988. The first ISLSCP field experiment (FIFE). *Bulletin American Meteorological Society*, 69(1): 22-27
- Sellers P, Hall F, Margolis H, Kelly B, Baldocchi D, den Hartog G, Cihlar J, Ryan M G, Goodison B, Ranson P C K J, Lettenmaier D and Wickland D E. 1995. The Boreal Ecosystem - Atmosphere Study (BOREAS): An Overview and Early Results from the 1994 Field Year. *Bulletin American Meteorological Society*, 76(9): 1549-1577
- Song W, Mu X, Yan G and Huang S. 2015. Extracting the green fractional vegetation cover from digital images using a Shadow-Resistant algorithm (SHAR-LABFVC). *Remote Sensing*, 7(8): 10425-10443
- Tian X, Li Z, Chen E, Liu Q, Yan G, Wang J, Niu Z, Zhao S, Li X, Pang Y, Su Z, van der Tol C, Liu Q, Wu C, Xiao Q, Yang L, Mu X, Bo Y, Qu Y, Zhou H, Gao S, Chai L, Huang H, Fan W, Li S, Bai J, Jiang L and Zhou J. 2015. The complicate observations and Multi-Parameter land information constructions on allied telemetry experiment (COMPLICATE). *PLOS ONE*, 10(9): e0137545
- Ullman S. 1979. The Interpretation of Structure from Motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 203(1153): 405-426
- Widlowski J L, Pinty B, Lopatka M, Atzberger C, Buzica D, Chelle M, Disney M, Gastellu-Etchegorry J, Gerboles M, Gobron N, Grau E, Huang H, Kallel A, Kobayashi H, Lewis P E, Qin W, Schlerf M, Stuckens J and Xie D. 2013. The fourth radiation transfer model intercomparison (RAMI-IV): Proficiency testing of canopy reflectance models with ISO-13528. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(13): 6869-6890
- Wu X, Xiao Q, Wen J, You D and Hueni A. 2019. Advances in quantitative remote sensing product validation: Overview and current status. *Earth-Science Reviews*, 196: 102875
- Xia J, Chen J, Piao S, Ciais P, Luo Y and Wan S. 2014. Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming. *Nature Geoscience*, 7(3): 173-180
- Xi X H, Luo S Z, Wang F J and Wang C. 2012. Current situation and development review of terrestrial 3D laser scanning system. *Geospatial Information*, 10(6): 13-15 (习晓环, 骆社周, 王方建, 王成. 2012. 地面三维激光扫描系统现状及发展评述. *地理空间信息*, 10(6): 13-15)
- Yan G, Chu Q, Tong Y, Mu X, Qi J, Zhou Y, Liu Y, Wang T, Xie D, Zhang W, Yan K, Chen S and Zhou H. 2020. An operational method for validating the downward shortwave radiation over rugged

- terrains. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1-18
- Yan G J, Zhao T J, Mu X H, Wen J G, Pang Y, Zhang Y G, Chen D Q, Yao C B, Cao Z Y, Lei Y H, Ji D B, Chen L F, Liu Q H, Lu L Q, Chen J M and Shi J C. 2021. Comprehensive Remote Sensing Experiment of Carbon Cycle, Water Cycle and Energy Balance in Luan River Basin. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(4): 856-870 (阎广建, 赵天杰, 穆西晗, 闻建光, 庞勇, 张永光, 陈德清, 姚崇斌, 曹志宇, 雷永荟, 姬大彬, 陈良富, 柳钦火, 吕利清, 陈镜明, 施建成. 2021. 滦河流域碳、水循环和能量平衡遥感综合试验总体设计. *遥感学报*, 25(4): 856-870)
- Zhang X, Qiu F, Zhan C, Zhang Q, Li Z, Wu Y, Huang Y and Chen X. 2020. Acquisitions and applications of forest canopy hyperspectral imageries at hotspot and multiview angle using unmanned aerial vehicle platform. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(2): 022212
- Zhang Y, Chen J M, Miller J R and Noland T L. 2008. Retrieving chlorophyll content in conifer needles from hyperspectral measurements. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34, 296-310

Airborne comprehensive remote sensing experiment of forest and grass resources in Xiaoluan River Basin

MU Xihan¹, YAN Guangjian¹, ZHOU Hongmin¹, PANG Yong^{2,3}, QIU Feng^{4,5}, ZHANG Qian^{4,5}, ZHANG Yongguang^{4,5}, XIE Donghui¹, ZHOU Yingji¹, ZHAO Tianjie⁶, ZHONG Bo⁶, SONG Jinling¹, SUN Rui¹, JIANG Lingmei¹, YIN Siyang¹, LI Fan¹, JIAO Ziti¹, QU Yonghua¹, ZHANG Wuming^{7,8}, CHENG Shun⁹, CUI Tongxiang⁹

1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Engineering Research Center for Globe Land Remote Sensing Products, Beijing 100875, China;
2. Institute of Forest Resource Information Technique, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
3. Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China;
4. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
5. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing 210023, China;
6. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
7. School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;
8. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhuhai), Zhuhai 519080, China;
9. Saihanba Mechanical Forest Farm of Hebei Province, Chengde 068450, China

Abstract: Comprehensive remote sensing experiments play an important role in the development of remote sensing science and technology. Both the fundamental research and application of remote sensing need to be supported by experiments. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science (SLRSS) has organized a large remote sensing experiment for the studies of carbon cycle over complex land surfaces in the upper reaches of the Xiaoluan River basin since 2018. This paper is targeted to introduce the objectives, study regions, observation parameters, methods and prospects of the experiment and to provide a useful reference for the design of remote sensing experiments.

The experiment adopted the satellite, airborne, and ground-based remote sensing, collected the data from the satellites in orbit and the remote sensing products covering the study region. The aerial and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remote sensing experiments were carried out with optical sensors to obtain key parameters of water cycle, carbon cycle and energy flow. Ground observation experiments were synchronously carried out to monitor the key parameters of atmosphere, vegetation and soil.

Rich amount of remote sensing data were collected from ground observation experiments, UAV and aerial remote sensing experiments. Driven by the experiment, the SLRSS set up a number of comprehensive observation towers in the experimental area in 2020, equipped with a variety of observation instruments and started long time series observation task. The construction of the large scale virtual scenery for remote sensing experiment and the operation of the BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator) model are being carried out.

The comprehensive experiment on carbon cycle at complex surfaces in Xiaoluan River basin has effectively obtained the key parameters of surface water, energy and carbon cycles by using the satellite, airborne, and ground-based remote sensing. The experiment provides the important basic data for the development of remote sensing mechanism model, inversion method and scale transformation research. It has been used to establish a comprehensive validation platform for remote sensing mechanism models, to improve the applicability of remote sensing products at complex surfaces, and to clarify the physical process of carbon-water coupling on watershed scale.

Key words: remote sensing, comprehensive experiment, watershed scale, carbon cycle, Xiaoluan River, Saihanba

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41331171)