

山地生态系统全球变化关键参数立体观测与 高分辨率产品研发研究进展

李爱农¹, 边金虎¹, 缪国芳², 闻建光³, 何涛⁴, 穆西晗⁵, 赵伟¹,
张正健¹, 南希¹, 雷光斌¹, 焦中虎⁵, 程志强², 曾宏达², 谢东辉⁵,
游冬琴³, 李丽³, 田丰⁴, 靳华安¹, 江波⁵, 马一川⁴

1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610213;

2. 福建师范大学, 福州 350007;

3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

4. 武汉大学, 武汉 430072;

5. 北京师范大学, 北京 100875

摘要: 山地是全球变化的前哨。现有全球变化遥感数据集产品空间分辨率大多为公里级, 难以准确表征山地陆表强烈的时空间异质特征, 山地生态系统对全球变化的响应和适应科学认知亟需高时空分辨率、空间无缝、精度可靠的遥感产品支撑。面向山地生态系统立体观测与高分辨率监测产品需求, 科学技术部在“十三五”国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项中资助了“山地生态系统全球变化关键参数立体观测与高分辨率产品研发”项目(2020—2025)。本文简要介绍了该项目的立项背景、拟解决的关键科学问题、主要研究内容、实施方案和预期成果, 系统综述了项目执行以来在山地生态系统全球变化关键参数近地面立体观测实验体系、时空尺度扩展、遥感反演模型和遥感产品研发中已取得的研究进展。项目预期将提出1套山地生态系统全球变化关键参数立体综合观测实验适用技术, 生产王朗典型山地区域14种关键参数、高分辨率参考“真值”产品, 形成11种关键参数的高分辨率产品生产能力, 研制出世界首套覆盖全球山地7种关键参数、25年、逐月、30 m高分辨率数据集产品。研究成果将促进中国对全球山地生态系统的综合监测能力, 为山地全球变化和可持续发展研究, 特别是山区生态环境保护、防灾减灾、农业生产、水资源管理等提供科学数据和技术支撑。

关键词: 山地, 全球变化, 立体观测, 遥感产品, 高分辨率

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 李爱农, 边金虎, 缪国芳, 闻建光, 何涛, 穆西晗, 赵伟, 张正健, 南希, 雷光斌, 焦中虎, 程志强, 曾宏达, 谢东辉, 游冬琴, 李丽, 田丰, 靳华安, 江波, 马一川. 2025. 山地生态系统全球变化关键参数立体观测与高分辨率产品研发研究进展. 遥感学报, 29(6): 2015–2034

Li A N, Bian J H, Miao G F, Wen J G, He T, Mu X H, Zhao W, Zhang Z J, Nan X, Lei G B, Jiao Z H, Cheng Z Q, Zeng H D, Xie D H, You D Q, Li L, Tian F, Jin H A, Jiang B and Ma Y C. 2025. Research progress of the stereoscopic observation and high spatial resolution products development of key global change parameters for mountain ecosystem. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 2015–2034[DOI: 10.11834/jrs.20254361]

1 引言

作为联合国“千年生态系统评估”(MA)的十大地表系统之一, 山地是全球变化的前哨(Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015)。当前, 全球变暖从观测到模拟都已取得广

泛共识, 在山地区域呈现出随海拔升高增温加速的趋势(Pachauri等, 2014)。全球变化直接影响着山地水文过程、生态过程、生物地球化学过程等, 改变了山地水资源供给、固碳等生态系统服务功能(Immerzeel等, 2020; Peters等, 2019), 也对联合国《2030年可持续发展议程》中保护山

收稿日期: 2024-08-22; 预印本: 2025-04-17

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2020YFA0608700)

第一作者简介: 李爱农, 研究方向为山地定量遥感及其应用研究。E-mail: ainongli@imde.ac.cn

地生态系统的全球可持续发展目标 (SDG 15.4) 的实现构成潜在风险 (UN, 2015)。

在全球变化研究中, 遥感对地观测为准确认知和评估全球尺度下的陆地生态系统响应和适应研究提供了重要数据源。世界气象组织 (WMO)、国际卫星对地观测委员会 (CEOS) 等国际组织先后制定了多个卫星陆面气候研究计划, 美国宇航局 (NASA)、欧洲航天局 (ESA) 等陆续开展了卫星气候数据集生产服务。基于不同的卫星遥感观测平台, 国际上已发展出多种全球多要素遥感产品数据集, 如美国 MODIS 产品系列 (Justice 等, 2002)、欧洲 CGLS 系列 (Hollmann 等, 2013)、中国风云卫星遥感产品系列 (唐世浩 等, 2016) 和全球陆表遥感产品 (GLASS) 系列等 (梁顺林 等, 2020)。近年来, 国家重点研发计划“全球变化及应对”专项陆续启动了“全球气候数据集生成及气候变化关键过程和要素监测”、“全球碳循环关键参数立体观测与反演”、“全球能量循环和水循环关键参数的立体观测与遥感反演”等一系列项目 (刘良云 等, 2021; 梁顺林 等, 2016; Yang 等, 2020), 极大丰富了全球变化关键参数遥感数据集, 为共同应对全球变化做出了中国贡献。

山地由于其地表的高度空间异质性、地表过程的快速多变性, 山地生态系统对全球变化的响应和适应过程科学认知亟需空间分辨率更高、时间连续、空间无缝、精度可靠的全球变化关键参数遥感产品支撑。然而, 现有绝大部分全球遥感数据产品空间分辨率为百米级至公里级尺度, 难以准确表征山地陆表强烈的时空异质性。近年来, 随着全球尺度 10—30 m 分辨率遥感数据的不断积累, 全球和国家尺度高空间分辨率专题遥感数据产品不断发展, 如全球 30 m 分辨率地表覆盖数据产品 (GlobeLand30) (Chen 等, 2015; Zhang 等, 2024)、基于 Landsat 卫星数据的全球 30 m 雪被 (Gascoin 等, 2019)、Hi-GLASS FAPAR (Jin 等, 2022)、FVC (Song 等, 2022) 等, 为全球和区域高分辨率陆表监测提供了产品支撑。然而, 当前高分辨率遥感产品生产算法多未考虑山地特征 (Liang 等, 2024), 产品类型多样性、监测时长和产品精度目前都难以满足山地生态系统水、热、植被等参数动态过程及对气候变化响应和适应的长期研究需求。

山地立体观测体系以野外观测平台为核心, 实时或准实时获取山地表层全球变化关键参数多

尺度数据, 对发展和验证山地遥感反演模型和产品研制都起着关键作用。现有全球观测网络, 如“全球高山生态环境观测研究计划” (GLORIA) 网络 (Grabherr 等, 2000)、国际通量观测网络 (FLUXNET) 等的山地站点 (Baldocchi 等, 2001), 为山地生态系统长期观测提供了重要数据积累, 但现有数据仍极为有限, 且多数山地站点的观测设置尽量规避了山地地形的影响, 限制了对山地过程中地形效应的探讨, 也使得现有山地过程研究包含了极大的不确定性。此外, 由于服务目标不同, 现有观测多注重生态系统性状、特征及过程界面通量, 常常忽略了观测足迹在山地立体空间和遥感像元尺度上的代表性, 难以捕捉山地复杂立体空间及快速变化特征, 观测方法体系与卫星产品彼此相互验证不足, 直接应用于遥感产品生产与验证会引入显著不确定性 (Jin 等, 2017)。

山地区域具有局地气候多变、云雾和降水频繁、下垫面异质性高、地形阴影遮蔽等显著特点, 对山地生态系统进行准确遥感监测, 获取空间分辨率高、时间连续、空间无缝、精度可靠的全球变化关键参数遥感产品在技术上还具有较大挑战 (李爱农 等, 2016)。近年来, 在国家自然科学基金重点项目“山地典型生态参量遥感反演建模及其时空表征能力研究”、“复杂地形区地表短波辐射估算及时空扩展研究”等支持下 (李爱农 等, 2018a; Yan 等, 2016), 山地遥感建模和反演方法研究取得了显著进展, 为综合集成已有研究成果, 实现山地生态系统关键参数反演与产品生产提供了必要的理论与方法基础。

综上, 开展山地生态系统全球变化关键参数立体观测与高分辨率产品研制是对全球变化遥感数据集的重要补充和完善, 具有重要的方法与技术创新意义。为此, 国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项批复立项了“山地生态系统全球变化关键参数立体观测与高分辨率产品研制”项目。项目执行期 5 年 (2020.12—2025.11), 由中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所牵头, 联合福建师范大学、中国科学院空天信息创新研究院、武汉大学、北京师范大学等 5 家单位, 形成了一支覆盖遥感、生态学、全球变化、地理学等多学科交叉研究联合攻关团队。本文对项目背景、关注的科学问题、研究内容、总体研究方案、预期成果、已取得研究进展等做了系统介绍。

2 科学问题与研究内容

2.1 拟解决的关键科学问题

项目拟解决关键科学问题包括：(1) 山地生态系统现有观测欠缺考虑星—空—地立体关联，难以满足尺度扩展需要，如何实现山地三维立体观测体系，增强观测时空代表性？(2) 当前全球公里级遥感产品生产欠考虑地形影响，如何嵌套地形改正方法，发展山地适用反演模型和通用快速算法？(3) 遥感观测在山区易受云雨天气、地形阴影等影响，反演产品一致性差，时空不连续，如何高效生产高分辨率、时空连续的长时序全球山地数据产品？

2.2 主要研究内容

项目围绕“立体观测—算法研发—产品生产”逻辑链路，包括4个方面的研究内容：

(1) 山地生态系统全球变化关键参数近地面立体观测实验体系研发。在我国选择具有典型代表性的山地生态系统，甄选关键参数和敏感变量；基于地面矩阵/足迹观测、多地形梯度联网观测、无人机航空遥感观测平台等先进技术，设计兼顾山地坡度、坡向等地形要素的关键参数近地面立体观测方案；研发以索道移动平台为桥梁的动态观测技术，构建点—线—面多空间尺度、多植被类型、多地形组合的近地面立体观测实验体系。

(2) 典型山地生态系统全球变化关键参数星—空—地立体观测与时空尺度扩展。在典型山地区域，开展平地/坡地、阴坡/阳坡对比观测实验、卫星—无人机多传感器、高频次观测实验，形成近地面立体、无人机、卫星同步耦合的山地综合立体观测实验体系；构建山地三维真实场景，开展观测参数山地时空尺度扩展建模，量化模型不确定性和置信区间；构建产品生产平台，生产典型山地14种关键参数高分辨率时空尺度扩展参考“真值”产品。

(3) 山地生态系统全球变化关键参数遥感反演模型与算法研发。研究山地地表反射率反演方法，估算地形归一化地表反射率；发展耦合地形效应及云—地特征的高分辨率高精度水、热、碳关键特征参数遥感反演算法和优化策略，开展关键参数山地高分辨率产品试生产；以典型山地立体观测数据以及参考“真值”产品为主，充分利用全球主要观测站网，开展模型算法的精度评价和不确定性分析，

形成11种关键参数山地产品生产能力。

(4) 山地生态系统全球变化关键参数高分辨率产品研制与应用示范。研发7种关键参数全球尺度通用快速反演算法；集成遥感数据预处理共性技术，构建中高分辨率遥感观测数据集，综合各参数反演算法实现长时序、高分辨率、时空连续的全球变化关键参数产品生产；开展精度评价，评估项目产品时空表征能力及不确定性；针对全球变化敏感山地区域开展应用示范，分析区域山地生态系统气候变化响应与适应监测应用成效。

3 项目实施方案与预期成果

3.1 总体研究方案

项目实施方案将通过发展不同地形梯度、生态系统类型的山地近地面立体观测、地—空—天协同立体观测实验技术，构建山地星—空—地地基综合立体观测实验体系；通过典型山地三维真实遥感场景建模，发展复杂山地时空尺度扩展方法，建立典型山地区域高分辨率参考“真值”产品；研发山地适用关键参数反演模型、算法集成、数据同化等关键核心技术，形成通用快速反演算法，生产长时间序列、时空一致的全球山地生态系统全球变化关键参数产品，并开展应用示范，挖掘数据应用潜力。总体研究技术路线如图1所示。

3.2 典型研究区

项目选择分别位于中国三大地形阶梯内的王朗、塞罕坝和三明（上杭）为典型研究区（图2），所选区域在山地类型上具有典型的代表性。项目在3个典型区内均建立了野外观测站，布设有能量平衡、碳/水循环等参数观测设施，已开展长期地面观测，积累了丰富的观测数据。同时，3个站点山地遥感面临的地形和生态系统复杂度、阴影类型、云雾天气等挑战具有典型性，在区域上形成互补。

3.3 关键参数选择

围绕全球陆地生态系统能量平衡、碳/水循环过程，项目遴选的山地生态系统全球变化关键参数如图3所示。由于部分单要素参数如雪被、冰川等全球变化敏感参数全球已有较好基础数据产品，本项目综合考虑参数已有研究进展及内在逻辑关系，选择3大类共20种关键参数开展近地面观测。所选参数不仅包括主要循环过程直接观测参数，还包括各循环基本驱动参数，满足建模需要。

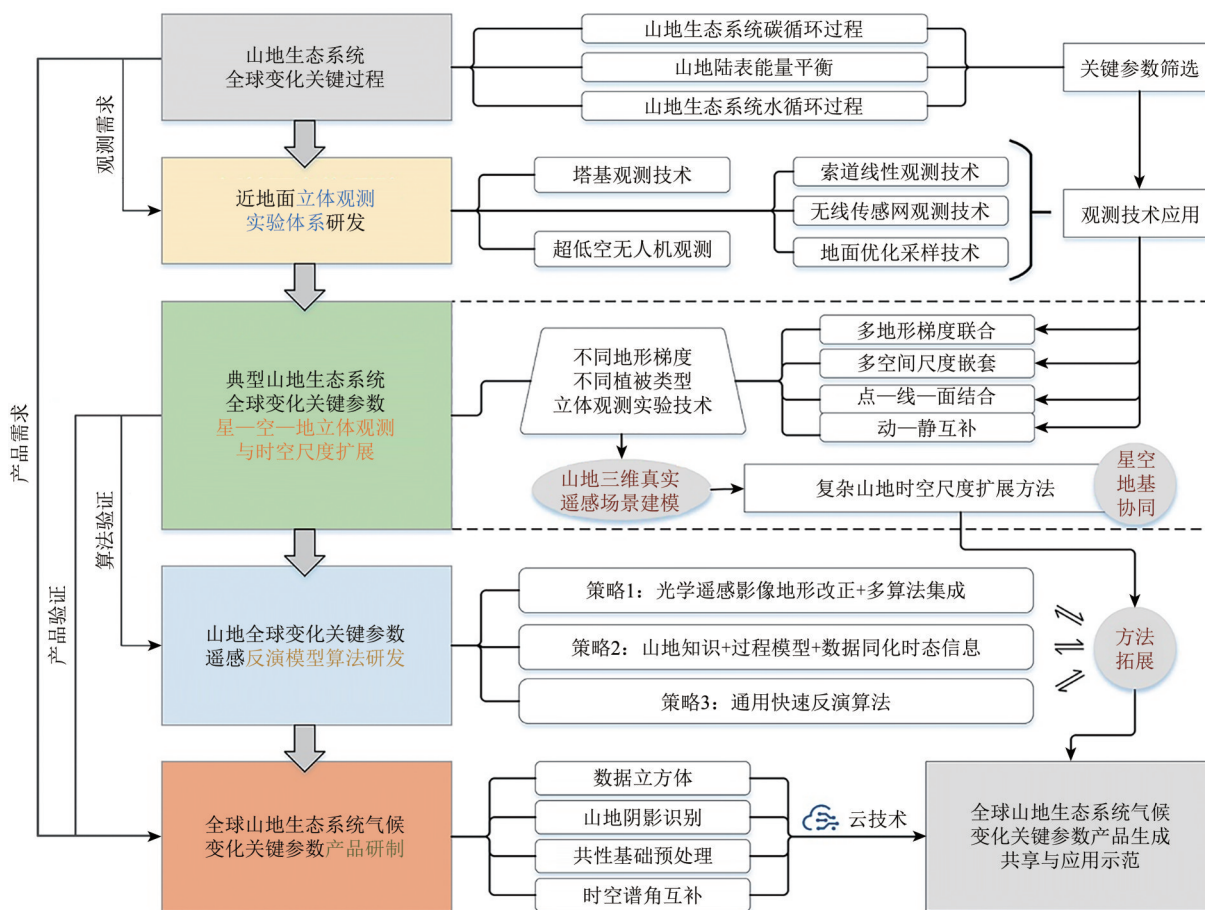


图1 总体研究技术路线

Fig. 1 Research scheme of the project

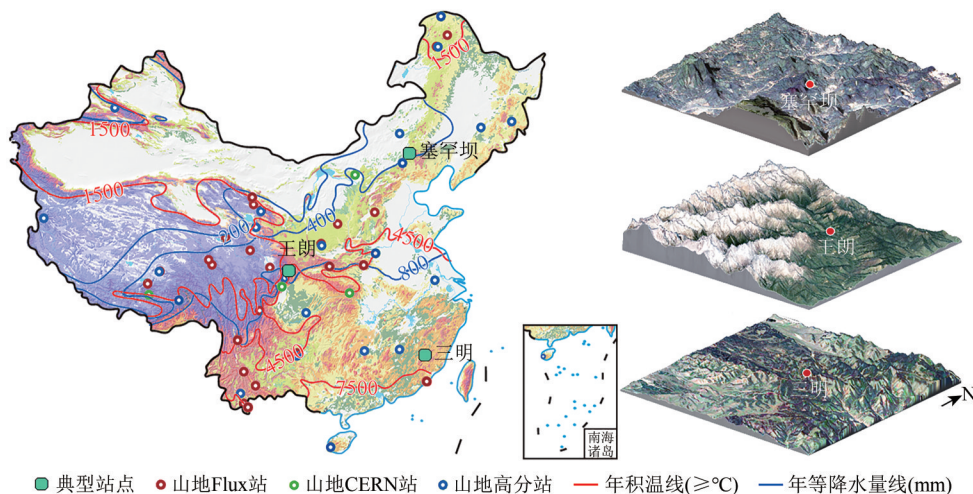


图2 3个典型山区位及其代表性(审图号:国审川字(2025)第23号)

Fig. 2 Locations and representativeness of the three typical mountainous research areas

3.4 预期成果

面向山地生态系统全球变化关键参数遥感精准监测需求,项目将构建面向山地生态系统的星-空-地地基三维立体观测实验技术体系,在我国典型山地生态系统观测站开展联网立体观测,获取20种涵盖碳/水循环、能量平衡等全球变化关键参

数观测数据集,发展山地适用时空尺度扩展和反演模型,生产14种关键参数高时空分辨率参考“真值”产品,研制世界首套覆盖全球山地、具有自主知识产权的长时序、高时空分辨率、精度可靠的7种遥感数据产品集,支撑山地生态系统全球变化研究。其中,参数具体技术指标如表1所示。

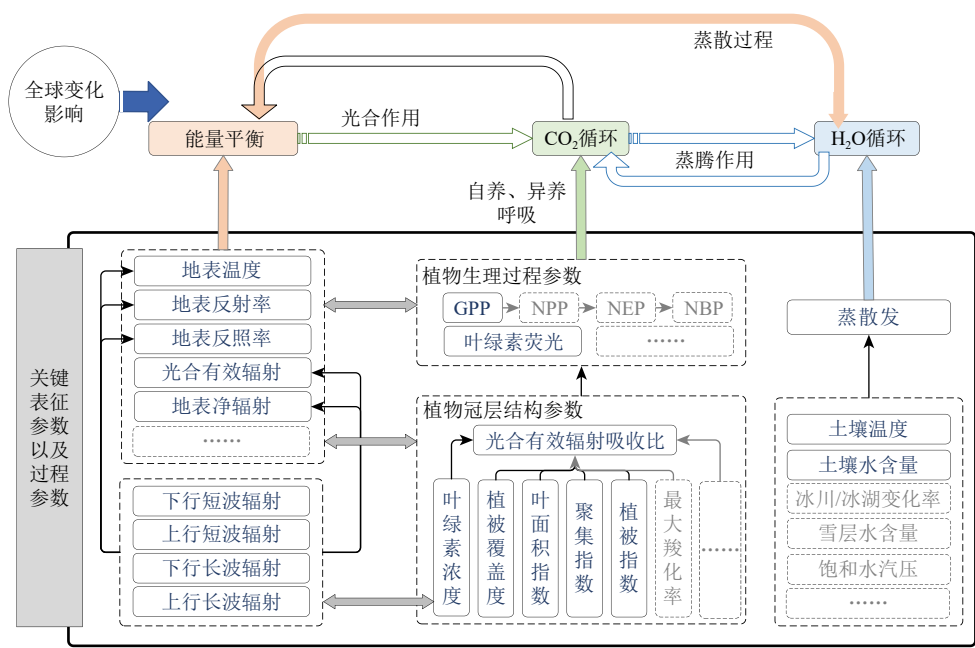


图3 山地生态系统全球变化关键参数及其逻辑关联 (蓝色参数为被遴选参数)

Fig. 3 Key global change parameters for mountain ecosystems and their logical relationships (Selected parameters in blue color)

表1 项目观测与产品研发技术指标

Table 1 technical indicators of the parameters observed and produced in this project

变量类别	变量名称	近地面立体观测		参考“真值”产品(5 km×5 km)				反演模型			全球产品			
		观测设备	观测频率	时间跨度	时间分辨率	空间分辨率	验证精度(误差)	时间分辨率	空间分辨率	反演精度(误差)	时间范围	时间分辨率	空间分辨率	产品精度(误差)
能量平衡	地表反射率	反射率自动测量系统 ^(a)	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<5%	瞬时	优于30 m	<15%	2000—2024	月	30 m	误差<20%
	反照率 ^(b)	四分量表	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<5%	月	优于30 m	<15%	2000—2024	月	30 m	无雪<0.08；有雪<20%
	地表净辐射 ^(b)	四分量表	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<10%	瞬时	优于30 m	<20%	2000—2024	月	30 m	<25 W/m ²
	下行短波辐射 ^(b)	四分量表	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<10%	瞬时	优于30 m	晴空<15% 云天<30%	—	—	—	—
	光合有效辐射	PAR表	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<10%	瞬时	优于30 m	晴空<15% 云天<30%	—	—	—	—
	地表温度 ^(b)	红外温度计	30 min	4 a	15 d	30 m	<1.5K	瞬时	优于120 m	<2.0K	—	—	—	—
	上行短波辐射 ^(b)	四分量表	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<10%	—	—	—	—	—	—	—
	下行长波辐射 ^(b)	四分量表	30 min	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	上行长波辐射 ^(b)	四分量表	30 min	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
土壤温度	土壤温湿度计	30 min	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

续表														
变量类别	变量名称	近地面立体观测		参考“真值”产品(5 km×5 km)				反演模型			全球产品			
		观测设备	观测频率	时间跨度	时间分辨率	空间分辨率	验证精度(误差)	时间分辨率	空间分辨率	反演精度(误差)	时间范围	时间分辨率	空间分辨率	产品精度(误差)
碳循环	归一化植被指数	反射率自动测量系统 ^(a)	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<5%	月	优于30 m	<20%	2000—2024	月	30 m	<25%
	植被覆盖度	覆盖度相机	每日	4 a	15 d	优于30 m	<10%	月	优于30 m	<15%	2000—2024	月	30 m	<20%
	光合有效辐射吸收比例 ^(b)	PAR表	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<10%	月	优于30 m	<15%	2000—2024	月	30 m	<25%
	叶面积指数 ^(b)	LAINet	每日	4 a	15 d	优于30 m	<0.8	月	优于30 m	<1	2000—2024	月	30 m	林地<1.5; 非林地<1.2
	总初级生产力	涡度相关系统(EC)	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<10%	—	—	—	—	—	—	—
	叶绿素浓度 ^(c)	叶绿素仪	每日	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	叶绿素荧光	植被荧光测量系统	30 min	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	聚集指数	LAINet	每日	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
水循环	土壤水分 ^(b)	土壤温湿度计	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<0.03 m ³ /m ³	瞬时	优于120 m	<0.04 m ³ /m ³	—	—	—	—
	蒸散发 ^(b)	涡度相关系统(EC)	30 min	4 a	15 d	优于30 m	<30 W/m ²	—	—	—	—	—	—	—

注：(a) 获取反射率与日光诱导叶绿素荧光(SIF)的两个光谱仪安装在同一套自动系统中;(b) 全球气候观测系统(global climate observing system, GCOS)指定陆表基本气候变量(Essential Climate Variables, ECVs);(c) 以每月人工采集叶片化学分析得到的叶绿素浓度校准。

4 研究进展

项目于2022年10月通过科技部组织的中期考核，已取得预期研究进展。

4.1 研发了山地生态系统全球变化关键参数近地面立体观测实验体系,制定了实验方案,开展了复杂山地近地面立体观测

由于山地地形对碳水循环、能量平衡过程中的全球变化影响并非线性关系，山地生态系统全球变化关键参数的近地面观测需要发展以地形特征为基础的山地观测方案，实现不同方法之间互相验证、补充或约束，以减小各类观测不确定性，服务山地遥感产品研发。依托王朗、塞罕坝和上杭3个典型山地区域，项目以“地形梯度—环境要素梯度—生态系统结构参数梯度—生态系统功能或过程的响应特征”为基本原则，分别开展了高山、中山和低山3种典型山地类型的地面样地多地形梯度布设方案和观测实验（Gao等，2024；Li等，2024；Cheng等，2024；Lin等，2023）；在四川王朗推动了“山地地表过程和生物多样性天空地—

体化监测平台”建设（李爱农等，2018b），以及在福建龙岩上杭建设全球首个山地“通量—大气—遥感”移动索道观测平台（林斯乾，2023），形成了考虑山地多地形梯度、多生态系统类型、点一线一面结合、动静互补的近地面立体观测体系（Bian等，2025）。搜集梳理了全球山地观测网络如NEON、SURFARD、AREONET等站点数据（Jiao和Mu，2022；Yang等，2023），构建了近地面立体观测数据集，开展站点地形效应对比分析。

4.1.1 多地形梯度近地面立体组网观测技术

地形起伏使得山地气候、生物和土壤等具有显著的垂直自然带特征。因此，考虑多地形梯度进行组网观测能够有效增强近地面观测的山地时空代表性。项目在王朗站结合区位代表性重点开展了多海拔梯度近地面立体组网观测技术研究（图4）。王朗站位于青藏高原东缘的高山峡谷区，植被垂直分异显著。项目根据研究区阔叶林、针叶林、灌丛和高山草甸，布设了4座多地形梯度塔基观测塔系统，搭载了碳水通量、能量平衡、气象因子的自动观测设备，并在地面布设了5层土壤温

湿度、土壤碳通量等观测设备进行组网观测；在塔基周边区域，布设了4个永久观测样地和40余个观测样方，布设了无线传感器自动观测网络

(Gao 等, 2024)，形成了“山地地表过程和生物多样性天空地一体化监测平台”。

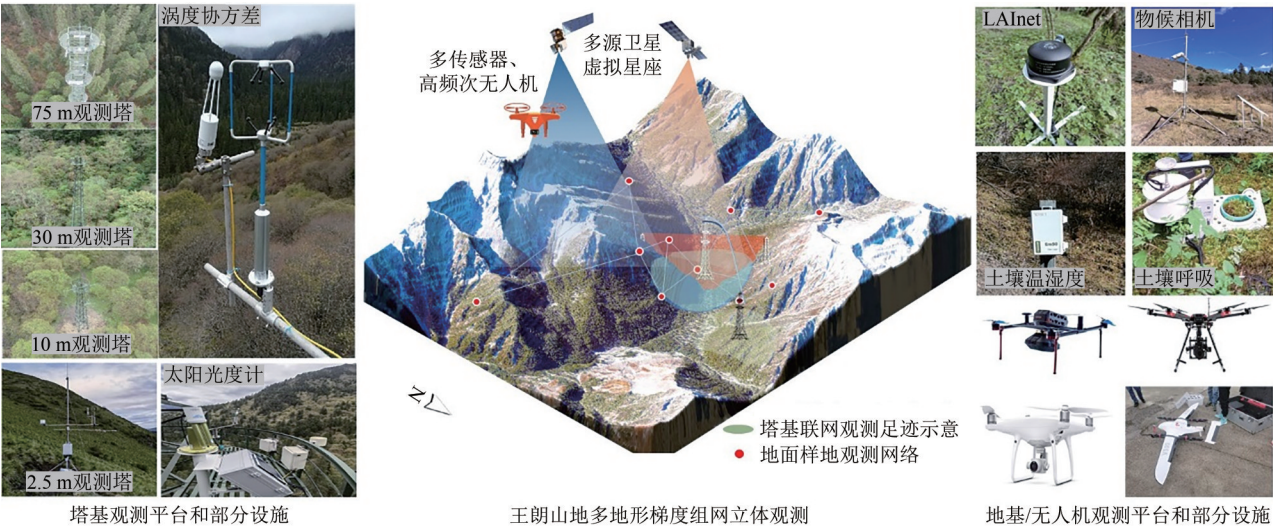


图4 王朗站多地形梯度近地面观测平台

Fig. 4 Near-surface observation platform along multiple topographic gradients at Wanglang Station

4.1.2 山地碳水通量近地面移动观测技术

受山地地形影响，传统的涡度相关通量观测技术在应用于山地生态系统碳水通量观测时，存在湍流通量观测不准确、平流通量观测缺失等不确定性问题 (Finnigan, 2008)，为监测山地生态系统碳水通量时相变化特征以及探索山地通量观测的不确定性，项目依托福建师范大学“上杭山地森林碳汇野外观测站”（以下简称上杭站）开展了山地碳水通量近地面移动观测技术研发。上杭

位于中国东南低山丘陵地区，植被覆盖以阔叶林和针叶林为主。上杭站的核心观测平台（图5），以双塔为基础，通过山坡—山谷移动通量观测方式不间断采集随地形变化的生态和大气过程参数，探索因复杂山地地形造成的湍流通量观测的不确定性，同时结合地面风场、二氧化碳/水汽浓度观测以及模型模拟探讨山地平流通量的估算方法，以期实现山地森林生态系统碳水通量及能量循环的动态变化的精准观测。



图5 上杭移动观测平台

Fig. 5 Mobile observation platform at Shanghang Station

4.2 开展了典型山地生态系统全球变化关键参数像元尺度星空地立体观测实验,研发了14种参数时空尺度扩展模型

4.2.1 山地生态系统全球变化关键参数星空地立体观测实验

山地星空地一体化遥感综合观测用以收集典型山地区域全球变化关键参数的像元尺度多时空维度精细配对数据,支撑由地基到无人机、乃至卫星的参数时空尺度扩展建模。项目发展了多尺度嵌套的时空代表度优化采样模型(Wen等, 2022b),构建了综合考虑样点在地形代表性、微地貌特征、可达性和植被代表性的优化采样方案(边金虎等, 2024),增强了野外像元尺度采样的时空代表性。基于地基三维雷达扫描和叶片尺度反射率实测数据,发展了山地三维真实场景构建的最佳体元构建方法(Lin等, 2023),实现了山地三维真实场景构建和像元尺度地表反射率模拟。分析了王朗无线传感器网络LAI-NOS站点观测数据与手持观测数据间的一致性(Gao等, 2024),上述研究有

效提升了山地像元尺度观测的时空代表性。项目还开展了王朗站山地塔基通量观测足迹的动态变化分析(邬昌林等, 2024);分析了王朗塔基四分量表辐射通量受地形影响的真实观测范围,实现了下行、上行短波辐射的像元尺度参考真值获取。

山地地形起伏造成无人机观测的不确定性。在光学传感器方面,地形影响了无人机传感器接收到冠层的入射辐射、散射辐射和周围地形反射辐射,通过对山地无人机观测不同辐射分量的地形效应进行校正,显著提升了基于无人机观测平台的叶面积指数估算精度(Cheng等, 2024)。针对山地无人机LiDAR数据分析表明(图6),地形的影响主要在于激光路径的差异带来点云密度、扫描角、光束足印大小等的变化,进而影响对结构参数的反演(Li等, 2024)。结合地面采集观测数据和无人机数据,实现了山地区域如卫星亚像元尺度的叶面积指数、聚集指数等结构参数和叶绿素浓度等生理参数高精度反演(Qiao等, 2022; Gu等, 2024)。

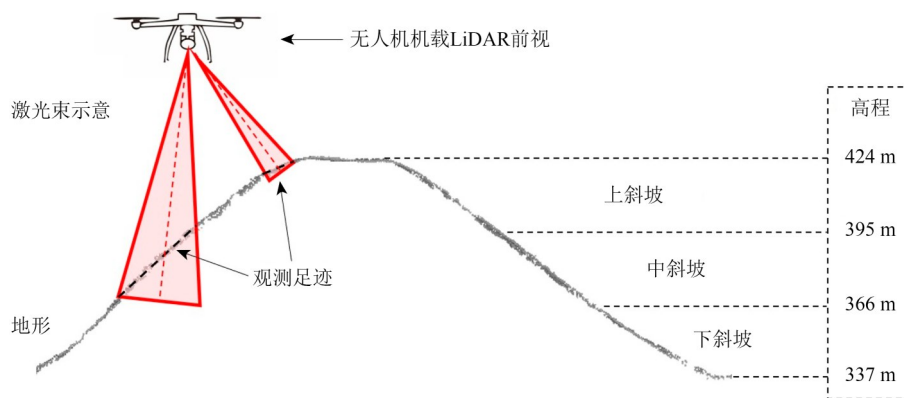


图6 不同坡度位置无人机激光雷达足迹差异示意(图片修改自(Li等, 2024))

Fig. 6 Schematic of UAV LiDAR footprint differences at different slope positions (Adapted from Li et al., 2024)

4.2.2 山地全球变化关键参数时空尺度扩展建模

将离散空间的站点观测与空间连续的遥感观测间建立关系模型进行时空尺度内插与外推,实现区域尺度时空连续参考真值获取是本研究的一项重要内容。项目首先分析了复杂地形、大气和云等因素对遥感产品、时空尺度扩展的影响,揭示了地形因素是参数时空尺度扩展不可忽略的关键因子。例如,基于日光诱导叶绿素荧光产品,系统分析了不同山地区域MODIS、GLASS、GIMMS产品在植被光合作用中的表现,发现不同遥感产品

在山地具有较大的不一致性(Xie和Li, 2023),进一步基于BEPs-Terrainlab模型,分析了16个山地流域不同分辨率降尺度模型的不确定性(Xie等, 2022),发现地形因素导致的不确定性是不可忽略因素。基于三维辐射传输模型,模拟了青藏高原15个区域地形反射辐射的时空特征,发现冬季晴日山地积雪区域导致的反射辐射比例在0.25%—10.85%,而春秋季节正午地形反射比例高达57%(图7),表明山地积雪反射辐射影响是导致山地太阳辐射观测和反演的重要因素(Chu等, 2021)。

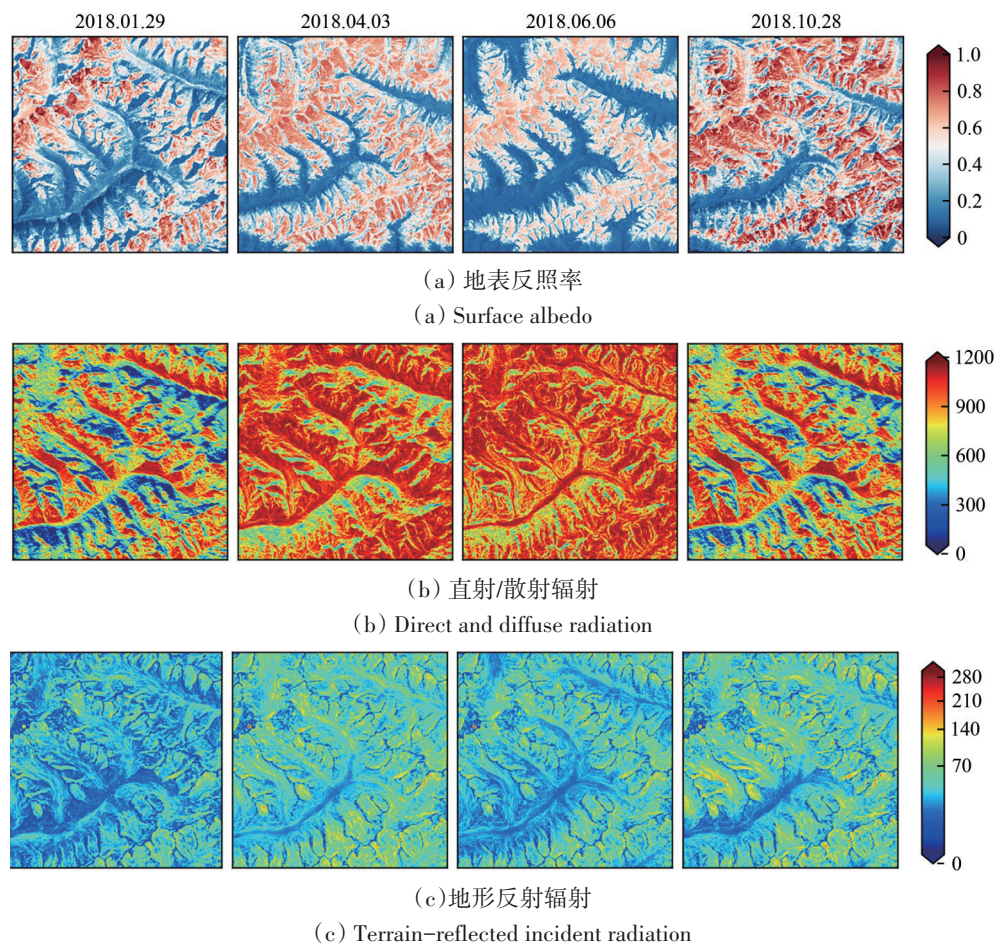


图7 青藏高原典型山地区域2018年1月29日,4月3日,6月6日,10月28日正午时刻反照率与下行辐射分布
(图片修自Chu等, 2021)

Fig. 7 Noon albedo and downward radiation distributions in typical mountainous regions of the Tibetan Plateau on January 29, April 3, June 6, and October 28, 2018 (Adapted from Chu et al., 2021)

针对山地能量平衡、碳/水循环参数时空变化特征和不同参数受地形影响特性,项目研发了4大类时空尺度扩展模型,实现复杂山地点尺度向面尺度、瞬时向连续时间尺度的时空尺度扩展。其中:

(1) 面向受地形反射、遮蔽等影响显著的如上下行短波辐射、长波辐射、光合有效辐射、反照率等能量平衡参数,针对周围地形对各分量影响构建地形结构因子算法,提升山地辐射分量精度;进一步发展地面站点观测与机理模型、遥感观测耦合的能量平衡参数空间尺度扩展模型(Jiao, 2022; Jiao和Mu, 2022; Jiao和Fan, 2024)。

(2) 面向遥感可直接反演的植被结构参数如植被覆盖度(FVC)、叶面积指数(LAI)、植被光合有效辐射吸收比率(FAPAR)等,分别研发以无人机为桥梁的山地星空地协同空间扩展模型和遥感模型模拟与机器学习算法结合的混合模型。例如,结合无人机观测激光雷达数据,模拟了山

地天空可视因子,纠正了无人机影像太阳入射辐射和临近地形反射,进一步计算了地形影响下的无人机多光谱地表反射率,结合地面站点LAI观测实现了无人机尺度的LAI扩展(Cheng等, 2024);针对LAI、FAPAR等遥感模型参数,利用遥感模型模拟和机器学习算法,发展了耦合机理模型和机器学习算法的时空尺度扩展混合模型(凌菊等, 2023; Jin等, 2022)。

(3) 面向机理过程复杂且遥感不能直接反演的地表过程参数如植被总初级生产力(GPP)、蒸散发(ET)、土壤水分等,结合已有遥感产品、山地改进模型和机器学习算法,发展了遥感产品降尺度模型。例如, Xie等(2023)通过耦合生态水文模型和线性与非线性降尺度过程,实现了王朗山地区域30 m分辨率GPP数据集构建(图8); Ding等(2024)研发了一种基于深度学习模型的分层重建方法实现了ESA CCI土壤水分产品空间缺失区域扩展。

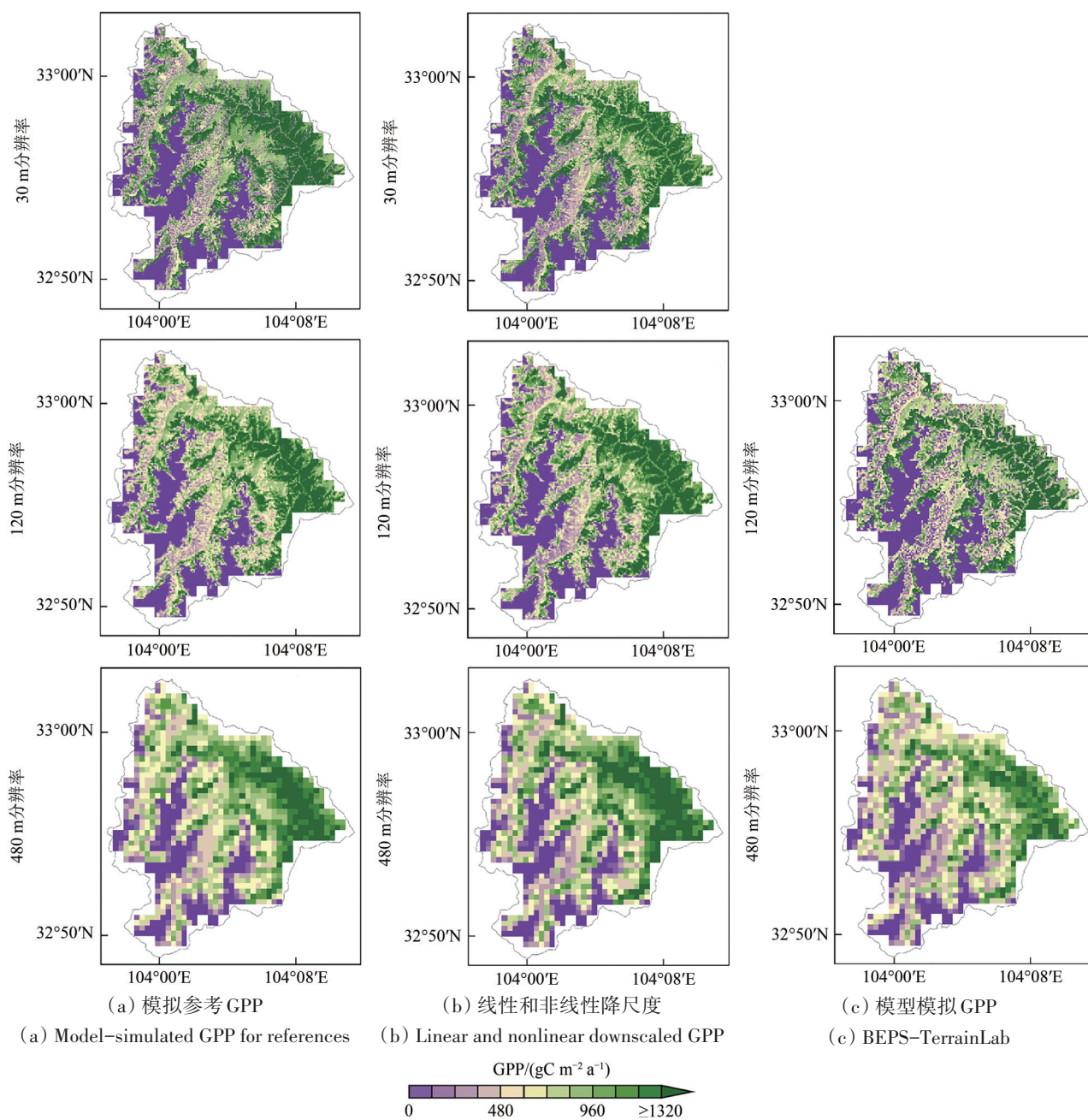


图8 王朗山区域GPP产品30 m分辨率降尺度模型结果(图片修自Xie等,2023)

Fig. 8 Downscaling model results for 30 m-resolution GPP product in Wanglang (Adapted from Xie et al., 2023)

(4) 在时间尺度扩展方面,项目进一步完善了山地区域耦合先验知识与遥感反演模型的时间尺度扩展技术。例如,以植被物候变化特征为约束,改进了山地年度温度周期模型,为山地地表温度的时间尺度扩展提供了模型基础(Zhao等,2022);进一步以年度气温变化特征先验知识为约束,采用随机森林算法结合地形特征实现了有云条件下地表温度产品的时空尺度扩展(Yang等,2024);基于双向长短时记忆网络和多源遥感产品,开展了山地区域时间序列LAI产品的时间尺度扩展(Liu等,2022b;Liu等,2022a)。

4.3 对山地生态系统关键参数反演地形影响机制进行了评价,构建了11种山地生态系统关键参数反演策略与方法,初步具备了产品生产能力

4.3.1 山地地形对关键参数反演影响机制

已有研究表明,地形是山地生态系统全球变化关键参数遥感反演误差的来源之一,并且不同反演策略其误差传递规律不同。项目系统梳理分析了国内外面向山地区域开展的全球变化关键参数反演影响机制,如表2所示,地形显著影响了不同参数山地反演精度。

表2 地形对关键参数反演的影响机制

Table 2 The influence mechanism of mountain terrain on key global change parameter inversion

序号	关键参量	影响机制	可存在的误差大小
1	短波下行辐射	地表高程、坡度、坡向变化,以及云阴影在地表投影空间畸变,对地表入射短波辐射再分配产生影响	300—500 W (Zhang 等, 2021)
2	地表反射率	太阳—观测几何改变、地形遮挡、阴影和多次散射	70%(Wen 等, 2009)
3	地表反照率	太阳—观测几何改变、太阳入射辐射和出射辐射改变	85%(Hao 等, 2020)
4	叶面积指数	太阳—观测几何改变、坡度导致植被介质分布变化	50% (Garrigues 等, 2006)
5	光合有效辐射比	太阳—观测几何改变、坡度导致植被介质分布变化	RMSE: 0.14 (Tao 等, 2015)
6	地表温度	太阳—观测几何改变、坡面多次散射、视在发射率	9 K (Yan 等, 2021)

4.3.2 山地生态系统全球变化关键参数反演策略与方法

将山地辐射传输过程参数化，构建考虑地形特征的山地参数反演模型，可为山地关键参数反演提供物理模型支撑。山地形成的遮蔽、阴影使正向的山地辐射传输前向建模更加复杂。项目发展了虑场景组分的简化山地几何光学模型 GOST 模型 (Hu 和 Li, 2022b)；引入山植被聚集指数，发展了适用于不同连续性植被场景的 BOST 模型等 (Hu 和 Li, 2022a)，为地形影响山地关键参数的机制分析以及反演方法的发展提供了重要模型基础。

项目系统梳理了遥感反演模型中的地形影响处理策略，一般包括两种：一是通过影像反射率地形校正纠正因地形起伏、遮掩等因素引起的辐射畸变，一定程度上能够获取相对准确的崎岖地表的观测信息 (林兴稳 等, 2020)；二是以未进行地形校正的遥感观测直接作为输入，在反演模型中考虑地形影响。

依据待反演参数与地形的关联程度，可以进一步细分为两类。一是与地形高度耦合的辐射参数，由于地形对辐射进行再分配，使得山地条件下的辐射参数需要回归到地形情境。因此，对于

遥感观测信号中的地形效应即便通过校正后，仍需回归到地形场景。以反照率反演为例，利用地形校正后的地表反射率计算反照率仍旧需要考虑地形对太阳入射方向的调制和角度积分的实际大小 (Wen 等, 2022a)。若输入未进行地形校正的地表反射率，在 BRDF/反照率的反演过程中，其正向的机理模型中需含有地形参数，反演时考虑地形的参数化 (Hao 等, 2020; Ma 等, 2022)。光合有效辐射、下行短波辐射和上行长波辐射 (温度) 反演都应耦合地形的影响 (Zhang 等, 2021)。另一类参数是与地形无关的地表结构参数，仅需考虑一次地形效应。如果剔除影像地形效应影响，即经过地形校正的遥感观测作为输入，则可认为剩下的信息来自地表结构参数，其反演不需要对地形再考虑。相反，如果输入反演的观测含有地形效应，那么反演过程所用模型需考虑地形的影响。该类地表结构参数主要有 LAI、FAPAR、FVC、植被指数 (VI) 等。例如，利用考虑地形的 GOSAILT 模型和任意倾斜叶片模型，发展了考虑坡面冠层阴影相互遮蔽和叶片散射的坡面 LAI 反演模型，提高了山地 LAI 反演精度 (图 9) (He 等, 2024)。

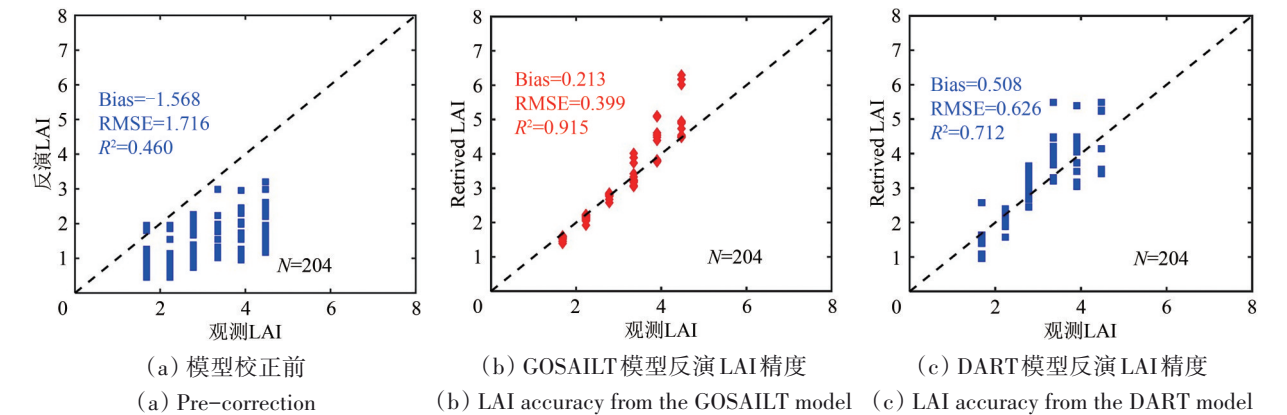


图9 地形校正前后 LAI 反演精度对比(图片修改自 He 等, 2024)

Fig. 9 Comparison of LAI inversion accuracy before and after topographic correction (Adapted from He et al., 2024)

此外,采用物理模型模拟不同地形条件下样本并进行机器学习模型训练和反演是一种可行思路,项目在LAI、FAPAR等参数方面开展了探索(李丽等,2023)。面向地表过程参量,由于高分辨率数据缺少,融合多种时空分辨率产品,如高空间分辨率的极轨数据和高时间分辨率的静止卫星数据,或者高空间分辨率的可见光数据与微波数据,从而获取高时空分辨率的数据产品是山地高时空分辨率产品获取的有效途径。项目在基于机器学习的地表温度降尺度(Ouyang等,2022)和土壤水分(Fan等,2022)等方面已开展探索。

4.4 开展了山地关键参数通用快速反演算法构建与验证,实现了7种全球山地生态系统关键参数数据集产品试生产,探索了典型高分辨率产品山地生态气候变化监测应用示范

4.4.1 山地高分辨率地表反射率共性基础产品

地表反射率是一定波长范围内特定观测方向上出射辐射通量和入射辐射通量的比值,是本项目全球山地关键参数估算的基础输入数据。项目利用多种评估手段对十种广泛使用的地形校正算法在多种地形和地表覆盖条件下进行了系统的评估比较(Ma等,2021,2024)。研究发现,不同地形校正算法对地形均有一定抑制作用,但具体到不同季相场景差异较大。研究通过引入三维辐射传输模型LESS提供了可对比的“真值”,首次发现一些模型可能引入校正偏差,为用户选择地形校正方法提供了参考。在此基础上,首先利用Landsat LEDAPS和LaSRC软件反演未经地形校正的地表反射率,再利用地形校正算法结合云掩膜产品进行非云地区的山地地表反射率地形校正,最终获得高质量的30 m分辨率全球山地地表反射率产品。

4.4.2 山地高分辨率地表辐射能量参数产品

(1) 地表反照率。地表反照率(Land surface albedo)是地表物体向各个方向反射的太阳总辐射通量与到达该物体表面的总辐射通量之比。作为控制能量收支的关键因素,高分辨率地表反照率在全球气候建模与变化分析中起着重要作用(He等,2018;Guo等,2022)。基于机器学习耦合三维辐射传输模型(Wang等,2020),项目进行了山地反照率产品快速反演算法研究,开发了一种利用

Landsat 8大气层顶观测数据(TOA)直接反演水平/水平的表面反照率(HHSA)和倾斜/倾斜的表面反照率(IISA)的通用方法(Ma等,2022)。地面站点验证结果表明,HHSA均方根误差和偏差分别为0.029和-0.010,而IISA分别为0.023和-0.001。结果发现HHSA与不考虑地形的反照率相似,但是IISA和前两者有很大差异。该反照率算法已和净辐射、植被指数、叶面积指数、植被覆盖度、光合有效辐射吸收比例算法(见下文)用于全球山地产品试生产(图10)。

(2) 地表全波段净辐射。遥感数据已成为估算地表净辐射(Surface net radiation)的主要数据来源,迄今为止已有大量粗分辨率遥感地表净辐射产品。现有辐射参数产品普遍未考虑复杂山区的地形效应,因此各产品在复杂山区的验证精度欠佳。项目应用Landsat 8和Sentinel-2大气上界反射率数据,结合山地辐射传输模型发展了全天空短波辐射估算模型,基于塞罕坝站点观测数据验证表明,与平地地表相比,在有云情况下地形引起的短波辐射误差可高达200 W/m²,山地短波辐射估算精度提高了46.1%(Ma等,2023)。进一步系统对比了CERES、GLASS、Hi-GLASS地表净辐射产品山地特征发现,CERES、GLASS两套产品在山区的直接验证精度随高程增加而普遍呈下降趋势,而分辨率较高的Hi-GLASS产品,在承德山区的直接验证精度结果表明,晴空下存在严重低估问题,且坡度坡向等对辐射的影响显著,为山地净辐射产品研发提供了基础(Jiang等,2023)。

4.4.3 山地高分辨率地表植被碳循环参数产品

(1) 植被覆盖度。植被覆盖度FVC(Fractional Vegetation Cover)是指绿色植被(包括植物的叶,茎和枝)在整个统计区域中的垂直投影面积中所占的百分比,是对区域植被生长状况进行直接量化的指标。本项目基于Landsat卫星数据,通过Landsat 8和高分2号数据基于随机森林算法选择训练样本(Song等,2022),已开展全球山地区域植被覆盖度产品构建。总体上,Landsat FVC产品在空间分辨率方面优于其他FVC产品,通过提供更精细的植被分布细节,使其在研究小区域的植被方面更加有效,可以进行长期植被动态监测。

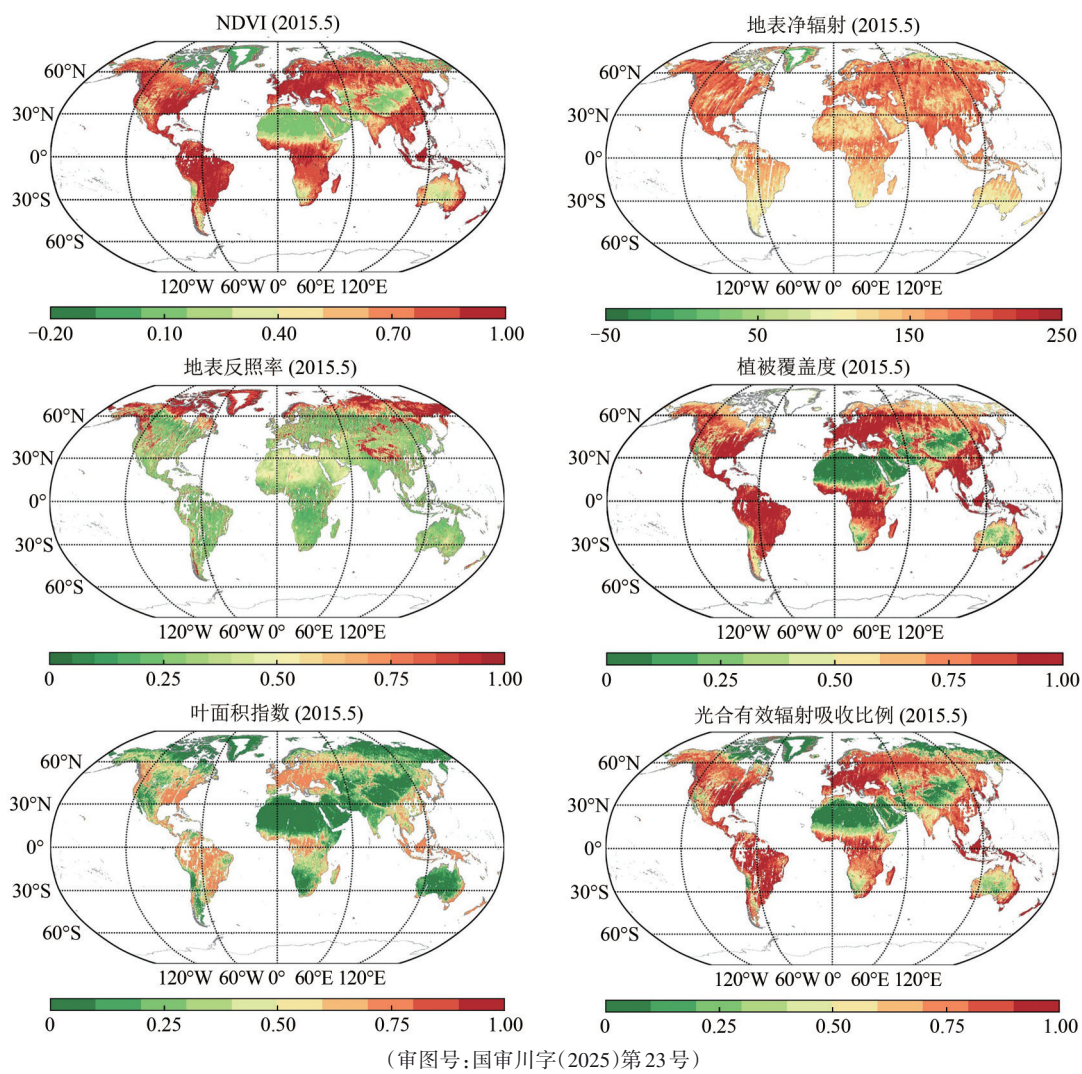


图 10 6 种山地生态系统全球变化关键参数全球 30 m 分辨率遥感产品试生产效果

Fig. 10 Pilot 30-m resolution global products of six key global change parameters for mountain ecosystem

(2) 叶面积指数。叶面积指数 LAI (Leaf Area Index) 通常定义为单位地表面积上叶子表面积总和的一半 (Chen 和 Black, 1992), 是描述大气—植被—土壤间能量和物质交换的关键参数。然而, 现有绝大部分 LAI 产品空间分辨率多为公里级及以上尺度, 在异质地表应用时混合像元问题严重, 难以满足小区域尺度精细化信息提取的要求 (Xu 等, 2020)。项目基于 30 m 分辨率 Landsat 卫星遥感数据, 提出了辐射传输模型驱动的 LAI 深度学习快速反演算法。与全球尺度收集的 GBOV、ImageS、VELERI 等验证网络站点实测数据相比, 本项目 30 m 分辨率 LAI 反演算法具有较好的估算精度 ($R^2=0.84$, $RMSE=0.70$), 其表现优于平地反演模型 ($R^2=0.46$, $RMSE=0.86$) (凌菊 等, 2023)。

(3) 光合有效辐射吸收比例光合有效辐射吸收比例 FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically

Active Radiation) 通常定义为植被对 400—700 nm 波长范围内的太阳辐射能量的吸收比例, 是全球气候观测系统认定的关键气候变化参数之一。本项目基于 30 m 分辨率 Landsat 卫星遥感数据, 提出了辐射传输模型驱动的山地黑空、白空和蓝空 FAPAR 机器学习反演算法体系, 其不依赖植被类型, 具有较好的普适性, 提高了 FAPAR 遥感产品反演精度。与全球尺度收集的 GBOV、ImageS、VELERI 等验证网络站点实测数据相比, FAPAR 产品生产算法具有较好的估算精度 (蓝空 FAPAR: $R^2=0.91$, $RMSE=0.09$; 黑空 FAPAR: $R^2=0.94$, $RMSE=0.11$; 白空 FAPAR: $R^2=0.88$, $RMSE=0.10$), 优于当前粗分辨率遥感产品, 且空间纹理细节信息更为丰富 (Jin 等, 2022)。

4.4.4 全球山地高分辨率监测产品应用示范案例

全球山地高时空分辨率遥感产品在全球变化

背景下的山地生态系统响应与适应分析中具有重
要应用价值。项目构建了植被指数—海拔分析模
型，提取植被绿度随海拔变化的两个转折点作为
树线和植被线海拔高度（图 11），分析了全球树线
和植被线沿纬度和坡向的分布模式及其地形、气
候和土壤等方面的影响因子（Zou 等，2023）。该
研究提供的全球山地植被线综合制图填补了相应
领域的空白，有助于区域和全球尺度上的山地生
态系统评估，所提出的方法也为全球高山生态系
统的气候响应监测应用提供了重要参考示范案例。

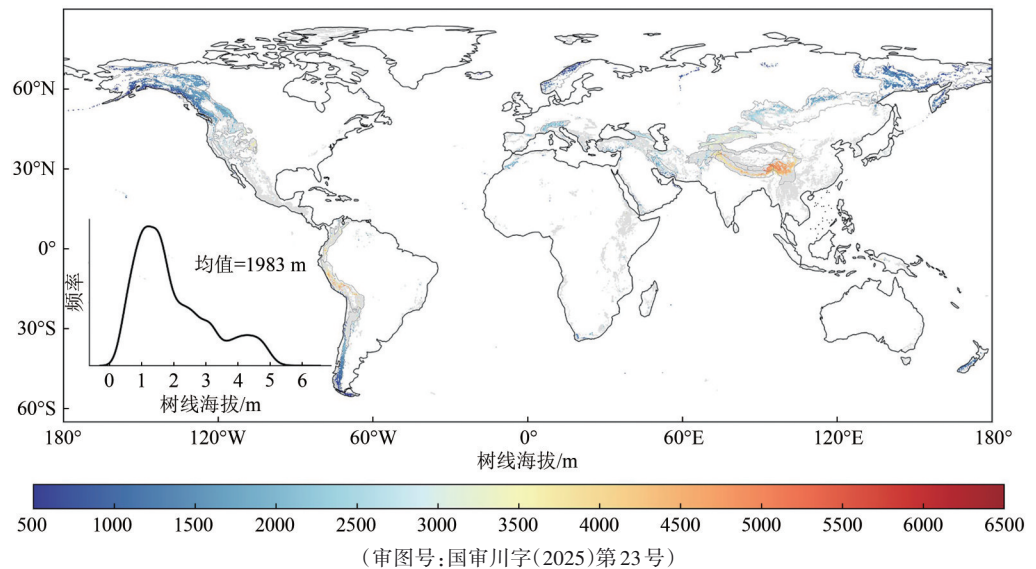


图 11 全球高山植被树线海拔上限空间分布(图片修改自(Zou 等,2023))

Fig. 11 Global spatial distribution of the upper elevation limits of alpine treelines (Adapted from Zou et al., 2023)

团队利用高分辨率物候与生产力数据，研究
了2018欧洲极端干热事件下，斯堪的那维亚山脉
南麓针叶林扰动响应中的地形分异作用（Sang 等，
2024）。研究表明，森林抵抗复原力在南向坡、陡
坡相对于北向坡、缓坡低 5%—7%，且陡坡较于缓
坡滞后响应率高 15% 以上（图 12）。在物候方面，
则发现了高海拔地区春季迟绿现象的减弱与秋季
早凋的增强（均为约 3 日/500 m 高程差），展示了
植被干旱响应中的地形效应，并为地形分异相关
研究提供了可行的路径。

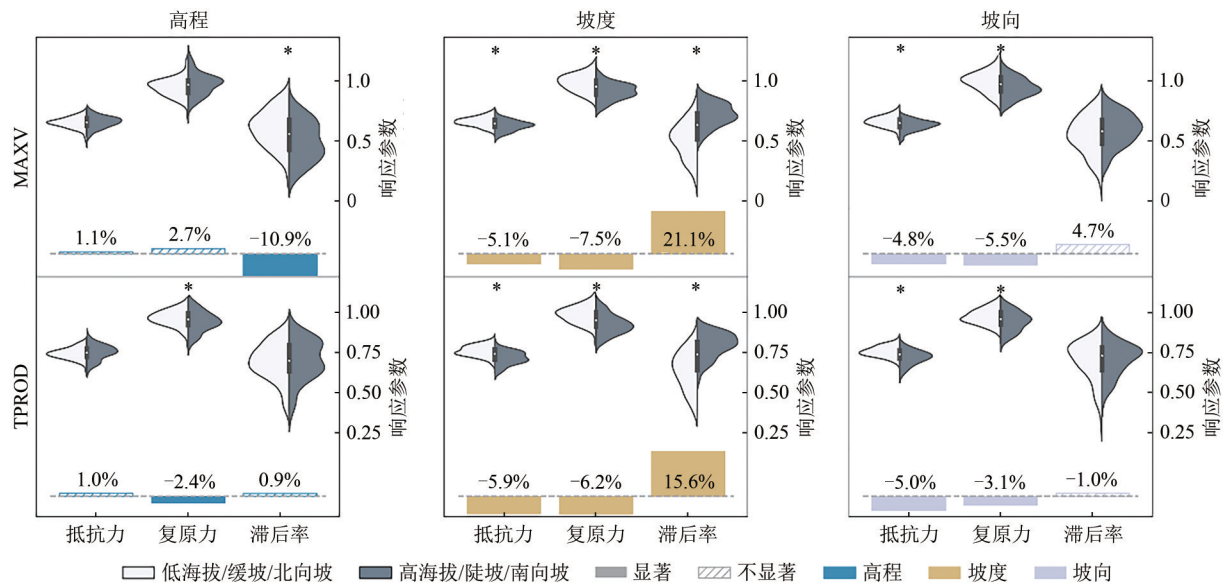


图 12 地形对森林抵抗—复原力及滞后响应率的分异作用(图片修改自(Sang 等,2024))

Fig. 12 Differential effects of topography on forest resistance, resilience, and hysteresis response rates (Adapted from Sang et al., 2024)

5 结 语

山地是全球变化敏感区和研究热点区域。山地生态系统立体观测与高分辨率产品是准确监测全球变化背景下山地生态系统响应与适应过程的重要技术手段和科学数据基础。现有较粗分辨率数据产品在山地空间的时空一致性差、精度低，长时序、高时空分辨率、精度可靠的山地遥感监测数据集产品十分欠缺。因此，亟需开展山地生态系统全球变化关键参数的立体化观测、反演模型和高分辨率遥感产品研究，填补全球山地空白。

国家重点研发计划项目“山地生态系统全球变化关键参数立体观测与高分辨率产品研制”的目标就是构建面向山地生态系统的星—空—地三维立体观测实验技术体系，在中国3个典型山地生态系统观测站点间开展联网立体观测，获取涵盖碳/水循环、能量平衡等全球变化关键参数观测数据集，发展山地适用时空尺度扩展和反演模型，生产关键参数高时空分辨率参考“真值”产品，研制世界首套覆盖全球山地、具有自主知识产权的长时序、高时空分辨率、精度可靠的遥感数据集产品。项目执行3年以来，在中国华北塞罕坝、西南王朗和东南上杭开展了不同气候带、地形条件、植被覆盖类型的典型山地立体观测体系研究，发展了14种全球变化关键参数时空尺度扩展模型，开展了11种参数的高分辨率遥感反演模型研究，搜集与处理了2000年—2024年以来的高分辨率Landsat、Sentinel-2A/B系列遥感数据，形成了通用快速反演算法，开展了长时间序列、时空一致的全球山地生态系统全球变化关键参数产品生产。项目预期能够提供7种长时序、30 m分辨率、月尺度的全球山地覆盖遥感产品与共享服务，促进中国对全球山地生态系统的综合监测能力，为山地全球变化研究和山区社会可持续发展，特别是山区生态环境保护、防灾减灾、农业生产、水资源管理等方面提供科学数据和技术支撑。

志 谢 本文主体内容来自国家重点研发计划“全球变化及应对”重点专项“山地生态系统全球变化关键参数立体观测与高分辨率产品研制”项目(2020YFA0608700)，是参与项目的22名科研骨干和众多研究生们的集体成果。特别致谢陈镜明、梁顺林等专家在项目执行过程中的悉心指导和帮助！

参考文献(References)

- Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, K. T P U, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K and Wofsy S. 2001. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11): 2415-2434 [DOI: 10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2]
- Bian J H, Li A N, Nan X, Zhang Z J, Lei G B, Zhao J P, Deng Y, Lin X H, Chen L M, and Naboureh A. 2025. “Stereoscopic remote sensing observation for mountains: Advancing monitoring, modeling, and management.” *The Innovation* 6 (5):100838.[DOI: j.xinn. 2025.100838]
- Bian J H, Li A N, Zhang Z J, Lei G B and Nan X. 2024. Mountain vegetation coverage field sampling point automatic optimization layout method and system. CN, 117973231A (边金虎, 李爱农, 张正健, 雷光斌, 南希. 2024. 一种山地植被覆盖度野外采样点自动优化布设方法及系统. 中国, 117973231A)
- Chen J, Chen J, Liao A P, Cao X, Chen L J, Chen X H, He C Y, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W W, Tong X H and Mills J. 2015. Global land cover mapping at 30m resolution: a POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 7-27 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002]
- Chen J M and Black T A. 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*, 15(4): 421-429 [DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x]
- Cheng Z Q, Chen J M, Guo Z X, Miao G F, Zeng H D, Wang R, Huang Z Q and Wang Y. 2024. Improving UAV-based LAI estimation for forests over complex terrain by reducing topographic effects on multispectral reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 1-19 [DOI: 10.1109/Tgrs.2023.3337177]
- Chu Q, Yan G J, Qi J B, Mu X H, Li L Y, Tong Y Y, Zhou Y J, Liu Y A, Xie D H and Wild M. 2021. Quantitative analysis of terrain reflected solar radiation in snow-covered mountains: a case study in south-eastern Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(11): e2020JD034294 [DOI: 10.1029/2020JD034294]
- Ding T, Zhao W and Yang Y Q. 2024. Addressing spatial gaps in ESA CCI soil moisture product: A hierarchical reconstruction approach using deep learning model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132: 104003 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.104003]
- Fan L, Al-Yaari A, Frappart F, Peng J, Wen J G, Xiao Q, Jin R, Li X J, Liu X Z, Wang M J, Chen X Z, Zhao L, Ma M G and Wigneron J P. 2022. Estimating high-resolution soil moisture over mountainous regions using remotely-sensed multispectral and topographic data.

- IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15: 3637-3649 [DOI: 10.1109/Jstars.2022.3166974]
- Finnigan J. 2008. An introduction to flux measurements in difficult conditions. *Ecological Applications*, 18(6): 1340-1350 [DOI: 10.1890/07-2105.1]
- Gao Z T, Chen Y P, Zhang Z J, Duan T X, Chen J C and Li A N. 2024. Continuous leaf area index (LAI) observation in forests: validation, application, and improvement of LAI-NOS. *Forests*, 15(5): 868 [DOI: 10.3390/f15050868]
- Garrigues S, Allard D, Baret F and Weiss M. 2006. Influence of landscape spatial heterogeneity on the non-linear estimation of leaf area index from moderate spatial resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 105(4): 286-298 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.013]
- Gascoin S, Grizonnet M, Bouchet M, Salgues G and Hagolle O. 2019. Theia snow collection: Hi-gh-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*, 11(2): 493-514 [DOI: 10.5194/essd-11-493-2019]
- Grabherr G, Gottfried M and Pauli H. 2000. GLORIA: a global observation research initiative in alpine environments. *Mountain Research and Development*, 20(2): 190-191 [DOI: 10.1659/0276-4741(2000)020[0190:GAGORI]2.0.CO;2]
- Gu Q, Huang F D, Lou W D, Zhu Y H, Hu H, Zhao Y Y, Zhou H K and Zhang X B. 2024. Unmanned aerial vehicle-based assessment of rice leaf chlorophyll content dynamics across genotypes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 221: 108939 [DOI: 10.1016/j.compag.2024.108939]
- Guo T C, He T, Liang S L, Roujean J L, Zhou Y Y and Huang X. 2022. Multi-decadal analysis of high-resolution albedo changes induced by urbanization over contrasted Chinese cities based on Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 269: 112832 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112832]
- Hao D L, Wen J G, Xiao Q, You D Q and Tang Y. 2020. An improved topography-coupled kernel-driven model for land surface anisotropic reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4): 2833-2847 [DOI: 10.1109/Tgrs.2019.2956705]
- He M, Wen J G, Wu S B, Meng L, Lin X W, Han Y, You D Q, Tang Y and Liu Q H. 2024. A new forest leaf area index retrieval algorithm over slope surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 1-18 [DOI: 10.1109/Tgrs.2023.3343876]
- He T, Liang S L, Wang D D, Cao Y F, Gao F, Yu Y Y and Feng M. 2018. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+, and OLI data based on the unified direct estimation approach. *Remote Sensing of Environment*, 204: 181-196 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.031]
- Hollmann R, Merchant C J, Saunders R, Downy C, Buchwitz M, Cazenave A, Chuvieco E, Defourny P, De Leeuw G, Forsberg R, Holzer-Popp T, Paul F, Sandven S, Sathyendranath S, Roozendael M V and Wagner W. 2013. The ESA climate change initiative: satellite data records for essential climate variables. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(10): 1541-1552 [DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00254.1]
- Hu G Y and Li A N. 2022a. BOST: a canopy reflectance model suitable for both continuous and discontinuous canopies over sloping terrains. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 1-19 [DOI: 10.1109/Tgrs.2022.3226460]
- Hu G Y and Li A N. 2022b. SGOT: a simplified geometric-optical model for crown scene components modeling over rugged terrain. *Remote Sensing*, 14(8): 1821 [DOI: 10.3390/rs14081821]
- Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, Bahl A, Biemans H, Bolch T, Hyde S, Brumby S, Davies B J, Elmore A C, Emmer A, Feng M, Fernández A, Haritashya U, Kargel J S, Koppes M, Kraaijenbrink P D A, Kulkarni A V, Mayewski P A, Nepal S, Pacheco P, Painter T H, Pellicciotti F, Rajaram H, Rupper S, Sinisalo A, Shrestha A B, Viviroli D, Wada Y, Xiao C, Yao T and Baillie J E M. 2020. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577(7790): 364-369 [DOI: 10.1038/s41586-019-1822-y]
- Jiang B, Han J K, Liang H, Liang S L, Yin X W, Peng J H, He T and Ma Y C. 2023. The Hi-GLASS all-wave daily net radiation product: algorithm and product validation. *Science of Remote Sensing*, 7: 100080 [DOI: 10.1016/j.srs.2023.100080]
- Jiao Z H. 2022. Estimating all-weather surface longwave radiation from satellite passive microwave data. *Remote Sensing*, 14(23): 5960 [DOI: 10.3390/rs14235960]
- Jiao Z H and Fan X W. 2024. Land surface longwave radiation retrieval from ASTER clear-sky observations. *Remote Sensing*, 16(13): 2406 [DOI: 10.3390/rs16132406]
- Jiao Z H and Mu X H. 2022. Single-footprint retrieval of clear-sky surface longwave radiation from hyperspectral AIRS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 110: 102802 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.102802]
- Jin H A, Li A N, Bian J H, Nan X, Zhao W, Zhang Z J and Yin G F. 2017. Intercomparison and validation of MODIS and GLASS leaf area index (LAI) products over mountain areas: a case study in southwestern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 55: 52-67 [DOI: 10.1016/j.jag.2016.10.008]
- Jin H A, Li A N, Liang S L, Ma H, Xie X Y, Liu T and He T. 2022. Generating high spatial resolution GLASS FAPAR product from Landsat images. *Science of Remote Sensing*, 6: 100060 [DOI: 10.1016/j.srs.2022.100060]
- Justice C O, Townshend J R G, Vermote E F, Masuoka E, Wolfe R E, Saleous N, Roy D P and Morisette J T. 2002. An overview of MODIS land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 3-15 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6]
- Li A N, Bian J H, Yin G F, Jin H A, Zhao W, Zhang Z J, Nan X and Lei G B. 2018a. Study on retrieving key ecological parameters in mountainous regions by remote sensing methods and evaluating their spatio-temporal representativeness. *Advances in Earth Science*, 33(2): 141-151 (李爱农, 边金虎, 尹高飞, 靳华安, 赵伟, 张正健,

- 南希, 雷光斌. 2018a. 山地典型生态参量遥感反演建模及其时空表征能力研究. *地球科学进展*, 33(2): 141-151 [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.02.0141]
- Li A N, Bian J H, Zhang Z J, Zhao W and Yin G F. 2016. Progresses, opportunities, and challenges of mountain remote sensing research. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1199-1215 (李爱农, 边金虎, 张正健, 赵伟, 尹高飞. 2016. 山地遥感主要研究进展、发展机遇与挑战. *遥感学报*, 20(5): 1993-2002 [DOI: 10.11834/jrs.20166227])
- Li A N, Yin G F, Zhang Z J, Tan J B, Nan X, Ma K P and Guo Q H. 2018b. Space-air-field integrated biodiversity monitoring based on experimental station. *Biodiversity Science*, 26(8): 819-827 (李爱农, 尹高飞, 张正健, 谭剑波, 南希, 马克平, 郭庆华. 2018b. 基于站点的生物多样性星空地一体化遥感监测. *生物多样性*, 26(8): 819-827 [DOI: 10.17520/biods.2018052])
- Li L, Xin X Z, Tang Y, Bai J H, Du Y M, Sun L, Wen J G, Zhong B, Wu S L, Zhang H L, Yu S S and Liu Q H. 2023. Fraction of absorbed photosynthetically active radiation inversion algorithm of GF-1 data combining radiative transfer model simulation and deep learning. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 700-710 (李丽, 辛晓洲, 唐勇, 柏军华, 杜永明, 孙林, 闻建光, 仲波, 吴善龙, 张海龙, 余珊珊, 柳钦火. 2023. 辐射传输模型模拟与深度学习结合的高分一号卫星植被光合有效辐射吸收比例产品反演算法. *遥感学报*, 27(3): 700-710 [DOI: 10.11834/jrs.20232021])
- Li Y F, Zeng H D, Xiong J F and Miao G F. 2024. Influence of topography on UAV LiDAR-based LAI estimation in subtropical mountainous secondary broadleaf forests. *Forests*, 15(1): 17 [DOI: 10.3390/f15010017]
- Liang S L, Bai R, Chen X N, Cheng J, Fan W J, He T, Jia K, Jiang B, Jiang L M, Jiao Z T, Liu Y B, Ni W J, Qiu F, Song L L, Sun L, Tang B H, Wen J G, Wu G P, Xie D H, Yao Y J, Yuan W P, Zhang Y G, Zhang Y Z, Zhang Y T, Zhang X T, Zhao T J and Zhao X. 2020. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019. *Journal of Remote Sensing*, 24(6): 618-671 (梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子铎, 刘元波, 倪文俭, 邱凤, 宋柳霖, 孙林, 唐伯惠, 闻建光, 吴桂平, 谢东辉, 姚云军, 袁文平, 张永光, 张玉珍, 张云腾, 张晓通, 赵天杰, 赵祥. 2020. 2019年中国陆表定量遥感发展综述. *遥感学报*, 24(6): 618-671 [DOI: 10.11834/jrs.20209476])
- Liang S L, He T, Huang J X, Jia A L, Zhang Y Z, Cao Y F, Chen X N, Chen X D, Cheng J, Jiang B, Jin H A, Li A N, Li S W, Li X C, Liu L Y, Liu X B, Ma H, Ma Y C, Song D X, Sun L, Yao Y J, Yuan W P, Zhang G D, Zhang Y F and Song L L. 2024. Advances in high-resolution land surface satellite products: a comprehensive review of inversion algorithms, products and challenges. *Science of Remote Sensing*, 10: 100152 [DOI: 10.1016/j.srs.2024.100152]
- Liang S L, Tang S H, Zhang J, Xu B, Cheng J, Cheng X, Gong P, Jia K, Jiang B, Li A N, Liu S H, Qiu H, Xiao Z Q, Xie X H, Yang J, Yang J G, Yao Y J, Yu G R, Zhang X T and Zhao X. 2016. Production of the global climate data records and applications to climate change studies. *Journal of Remote Sensing*, 20(6): 1491-1499 (梁顺林, 唐世浩, 张杰, 徐冰, 程洁, 程晓, 宫鹏, 贾坤, 江波, 李爱农, 刘素红, 邱红, 肖志强, 谢先红, 杨军, 杨俊刚, 姚云军, 于贵瑞, 张晓通, 赵祥. 2016. 全球气候数据集生成及气候变化应用研究. *遥感学报*, 20(6): 1491-1499 [DOI: 10.11834/jrs.20166359])
- Lin S Q. 2023. The world's first "Flux-Atmosphere-Remote Sensing Observation Platform" was inaugurated and put into operation in Shanghang. *Fujian Daily* [2023-08-11]. (林斯乾. 2023. 世界首个“通量—大气—遥感观测平台”在上杭揭牌运行. *福建日报* [2023-08-11])
- Lin X H, Li A N, Bian J H, Zhang Z J, Lei G B, Chen L M and Qi J B. 2023. Reconstruction of a large-scale realistic three-dimensional (3-D) mountain forest scene for radiative transfer simulations. *Giscience and Remote Sensing*, 60(1): 2261993 [DOI: 10.1080/15481603.2023.2261993]
- Lin X W, Wen J G, Wu S B, Hao D L, Xiao Q and Liu Q H. 2020. Advances in topographic correction methods for optical remote sensing imageries. *Journal of Remote Sensing*, 24(8): 958-974 (林兴稳, 闻建光, 吴胜标, 郝大磊, 肖青, 柳钦火. 2020. 地表反射率地形校正物理模型与效果评价方法研究进展. *遥感学报*, 24(8): 958-974 [DOI: 10.11834/jrs.20209167])
- Ling J, Li A N and Jin H A. 2023. Leaf area index estimation over mountainous areas by coupling the DART model and random forest. *Remote Sensing Technology and Application*, 38(1): 39-50 (凌菊, 李爱农, 靳华安. 2023. 基于DART模型和随机森林估算山地叶面积指数. *遥感技术与应用*, 38(1): 39-50 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.1.0039])
- Liu L Y, Bai Y, Sun R and Niu Z G. 2021. Stereo observation and inversion of the key parameters of global carbon cycle: project overview and mid-term progressess. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(1): 11-24 (刘良云, 白雁, 孙睿, 牛振国. 2021. “全球生态系统碳循环关键参数立体观测与反演”项目概述与研究进展. *遥感技术与应用*, 36(1): 11-24 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0011])
- Liu T, Jin H A, Li A N, Fang H L, Wei D D, Xie X Y and Nan X. 2022a. Estimation of vegetation leaf-area-index dynamics from multiple satellite products through deep-learning method. *Remote Sensing*, 14(19): 4733 [DOI: 10.3390/rs14194733]
- Liu T, Jin H A, Xie X Y, Fang H L, Wei D D and Li A N. 2022b. Bi-LSTM model for time series leaf area index estimation using multiple satellite products. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 2506805 [DOI: 10.1109/Lgrs.2022.3199765]
- Ma Y C, He T, Li A N and Li S K. 2021. Evaluation and intercomparison of topographic correction methods based on landsat images and simulated data. *Remote Sensing*, 13(20): 4120 [DOI: 10.3390/rs13204120]
- Ma Y C, He T, Liang S L, McVicar T R, Hao D L, Liu T and Jiang B. 2023. Estimation of fine spatial resolution all-sky surface net

- shortwave radiation over mountainous terrain from Landsat 8 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 285: 113364 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113364]
- Ma Y C, He T, Liang S L, Wen J G, Gastellu-Etchegorry J P, Chen J, Ding A X and Feng S Q. 2022. Landsat snow-free surface Albedo estimation over sloping terrain: algorithm development and evaluation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 1-14 [DOI: 10.1109/Tgrs.2022.3149762]
- Ma Y C, He T, McVicar T R, Liang S L, Liu T, Peng W S, Song D X and Tian F. 2024. Quantifying how topography impacts vegetation indices at various spatial and temporal scales. *Remote Sensing of Environment*, 312: 114311 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114311]
- Mountain Research Initiative EDW Working Group. 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5): 424-430 [DOI: 10.1038/Nclimate2563]
- Ouyang X Y, Dou Y J, Yang J X, Chen X and Wen J G. 2022. High spatiotemporal rugged land surface temperature downscaling over Saihanba forest park, China. *Remote Sensing*, 14(11): 2617 [DOI: 10.3390/rs14112617]
- Pachauri, R K, Allen M R, Barros V R, Broome J, Cramer W, Christ R, Church J A, Clarke L, Qin D H, Dasgupta P. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC*.
- Peters M K, Hemp A, Appelhans T, Becker J N, Behler C, Classen A, Detsch F, Ensslin A, Ferger S W, Frederiksen S B, Gebert F, Gerschlaue F, Gütlein A, Helbig-Bonitz M, Hemp C, Kindeketa W J, Kühnel A, Mayr A V, Mwangomo E, Ngereza C, Njovu H K, Otte I, Pabst H, Renner M, Röder J, Rutten G, Schellenberger Costa D, Sierra-Cornejo N, Vollstädt M G R, Dulle H I, Eardley C D, Howell K M, Keller A, Peters R S, Ssymank A, Kakengi V, Zhang J, Bogner C, Böhning-Gaese K, Brandl R, Hertel D, Huwe B, Kiese R, Kleyer M, Kuzyakov Y, Nauss T, Schleuning M, Tschapka M, Fischer M and Steffan-Dewenter I. 2019. Climate-land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions. *Nature*, 568(7750): 88-92 [DOI: 10.1038/s41586-019-1048-z]
- Qiao L, Gao D H, Zhao R M, Tang W J, An L L, Li M Z and Sun H. 2022. Improving estimation of LAI dynamic by fusion of morphological and vegetation indices based on UAV imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192: 106603 [DOI: 10.1016/j.compag.2021.106603]
- Sang Y R, Tian F, Jin H X, Cai Z Z, Feng L W, Dou Y J and Eklundh L. 2024. Assessing topographic effects on forest responses to drought with multiple seasonal metrics from Sentinel-2. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 128: 103789 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.103789]
- Song D X, Wang Z H, He T, Wang H and Liang S L. 2022. Estimation and validation of 30m fractional vegetation cover over China through integrated use of Landsat 8 and Gaofen 2 data. *Science of Remote Sensing*, 6: 100058 [DOI: 10.1016/j.srs.2022.100058]
- Tang S H, Qiu H and Ma G. 2016. Review on progress of the Fengyun meteorological satellite. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 842-849 (唐世浩, 邱红, 马刚. 2016. 风云气象卫星主要技术进展. 遥感学报, 20(5): 842-849) [DOI: 10.11834/jrs.20166232]
- Tao X, Liang S L and Wang D D. 2015. Assessment of five global satellite products of fraction of absorbed photosynthetically active radiation: Intercomparison and direct validation against ground-based data. *Remote Sensing of Environment*, 163: 270-285 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.025]
- UN. 2015. *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. UN
- Wang Y J, Lauret N and Gastellu-Etchegorry J P. 2020. DART radiative transfer modelling for sloping landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111902 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111902]
- Wen J G, Lin X W, Wu X D, Bao Y F, You D Q, Gong B C, Tang Y, Wu S B, Xiao Q and Liu Q H. 2022a. Validation of the MCD43A3 collection 6 and GLASS V04 snow-free albedo products over rugged terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5632311 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3214103]
- Wen J G, Liu Q, Liu Q H, Xiao Q and Li X W. 2009. Scale effect and scale correction of land-surface albedo in rugged terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 30(20): 5397-5420 [DOI: 10.1080/01431160903130903]
- Wen J G, Wu X D, Wang J P, Tang R Q, Ma D J, Zeng Q C, Gong B C and Xiao Q. 2022b. Characterizing the effect of spatial heterogeneity and the deployment of sampled plots on the uncertainty of ground “truth” on a coarse grid scale: case study for near-infrared (NIR) surface reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(11): e2022JD036779 [DOI: 10.1029/2022JD036779]
- Wu C L, Xie X Y and Li A N. 2024. Spatial representativeness of flux footprints at pixel scales over mountainous ecosystems. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(10): 2632-2650 (郇昌林, 谢馨瑶, 李爱农. 2023. 山地生态系统通量足迹遥感像元尺度空间代表性分析. 遥感学报, 28(10): 2632-2650) [DOI: 10.11834/jrs.20232509]
- Xie X Y and Li A N. 2023. How is the performance of satellite-based product suites in monitoring long-term dynamics of vegetation photosynthesis over global mountainous areas? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 119: 103325 [DOI: 10.1016/j.jag.2023.103325]
- Xie X Y, Li A N, Chen J M, Guan X B and Leng J Y. 2022. Quantifying scaling effect on gross primary productivity estimation in the upscaling process of surface heterogeneity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 127(7): e2021JG006775 [DOI: 10.1029/2021JG006775]
- Xie X Y, Li A N, Tian J, Wu C L and Jin H A. 2023. A fine spatial resolution estimation scheme for large-scale gross primary productivity (GPP) in mountain ecosystems by integrating an eco-hydrological model with the combination of linear and non-linear downscaling processes. *Journal of Hydrology*, 616: 128833 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128833]

- Xu B D, Li J, Park T, Liu Q H, Zeng Y L, Yin G F, Yan K, Chen C, Zhao J, Fan W L, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2020. Improving leaf area index retrieval over heterogeneous surface mixed with water. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111700 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111700]
- Yan G J, Chu Q, Tong Y Y, Mu X H, Qi J B, Zhou Y J, Liu Y N, Wang T X, Xie D H, Zhang W M, Yan K, Chen S B and Zhou H M. 2021. An operational method for validating the downward short-wave radiation over rugged terrains. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(1): 714-731 [DOI: 10.1109/Tgrs.2020.2994384]
- Yan G J, Wang T X, Jiao Z H, Mu X H, Zhao J and Chen L. 2016. Topographic radiation modeling and spatial scaling of clear-sky land surface longwave radiation over rugged terrain. *Remote Sensing of Environment*, 172: 15-27 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.026]
- Yang K, Chen Y Y, He J, Zhao L, Lu H, Qin J, Zheng D H and Li X. 2020. Development of a daily soil moisture product for the period of 2002-2011 in Chinese mainland. *Science China Earth Sciences*, 63(8): 1113-1125 [DOI: 10.1007/s11430-019-9588-5]
- Yang S Y, Zhang X T, Guan S K, Zhao W B, Duan Y J, Yao Y J, Jia K and Jiang B. 2023. A review and comparison of surface incident shortwave radiation from multiple data sources: satellite retrievals, reanalysis data and GCM simulations. *International Journal of Digital Earth*, 16(1): 1332-1357 [DOI: 10.1080/17538947.2023.2198262]
- Yang Y J, Zhao W, Yang Y Q, Xu M J, Mukhtar H, Tauqir G and Tarolli P. 2024. An annual temperature cycle feature constrained method for generating MODIS daytime all-weather land surface temperature. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4405014 [DOI: 10.1109/Tgrs.2024.3377670]
- Zhang H L, Dong X Q, Xi B K, Xin X Z, Liu Q H, He H M, Xie X P, Li L and Yu S S. 2021. Retrieving high-resolution surface photosynthetically active radiation from the MODIS and GOES-16 ABI data. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112436 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112436]
- Zhang X, Zhao T T, Xu H, Liu W D, Wang J Q, Chen X D and Liu L Y. 2024. GLC_FCS30D: the first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series Landsat imagery and the continuous change-detection method. *Earth System Science Data*, 16(3): 1353-1381 [DOI: 10.5194/essd-16-1353-2024]
- Zhao W, Yang Y J and Yang M J. 2022. An improved annual temperature cycle model with the consideration of vegetation change. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 7506305 [DOI: 10.1109/Lgrs.2022.3145380]
- Zou L Q, Tian F, Liang T C, Eklundh L, Tong X Y, Tagesson T, Dou Y J, He T, Liang S L and Fensholt R. 2023. Assessing the upper elevational limits of vegetation growth in global high-mountains. *Remote Sensing of Environment*, 286: 113423 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113423]

Research progress of the stereoscopic observation and high spatial resolution products development of key global change parameters for mountain ecosystem

LI Ainong¹, BIAN Jinhui¹, MIAO Guofang², WEN Jianguang³, HE Tao⁴, MU Xihan⁵, ZHAO Wei¹, ZHANG Zhengjian¹, NAN Xi¹, LEI Guangbin¹, JIAO Zhonghu⁵, CHENG Zhiqiang², ZENG Hongda², XIE Donghui⁵, YOU Dongqin³, LI Li³, TIAN Feng⁴, JIN Huaan¹, JIANG Bo⁵, MA Yichuan⁴

1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213;

2. Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094;

4. Wuhan University, Wuhan 430072;

5. Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract: Mountains serve as sentinels of global change, exhibiting an accelerated warming trend with increasing elevation. Global change directly impacts critical mountain surface processes including hydrological cycles, ecological dynamics, and biogeochemical fluxes, thereby threatening future water resource availability and ecosystem services in mountainous regions. While remote sensing Earth observation provides essential data sources for studying mountain ecosystem dynamics, most existing global change remote sensing datasets exhibit kilometer-level spatial resolutions that inadequately characterize the intense spatiotemporal heterogeneity of mountain surfaces. There is an urgent need for high spatiotemporal resolution, spatially seamless, and accuracy-reliable remote sensing products to enhance scientific understanding of mountain ecosystems' responses and adaptations to global change. In recent years, the mountain remote sensing modeling and parameter retrieving algorithms have witnessed significant advances, where comprehensive field observation platforms for typical

mountainous regions have been established. These developments have laid a solid foundation for conducting stereoscopic monitoring of global change-critical parameters in mountain ecosystems and subsequent high-resolution product development. Addressing the requirements for stereoscopic observation and high-resolution monitoring products in mountain ecosystems, the Ministry of Science and Technology of China funded the project named “the stereoscopic observation and high spatial resolution products development of key global change parameters for mountain ecosystem” (2020—2025) in the key programme of “Global Change and Response” under the National Key Research and Development Plan during the 13th Five-Year Plan period. This paper outlines the project’s background, key scientific challenges, research objectives, implementation framework, and expected outcomes. It systematically reviews progress achieved in establishing near-surface stereoscopic observation systems, spatiotemporal scaling expansion methods, remote sensing retrieval models, and product development for global change parameters in mountain ecosystems. This project will establish ground-aerial-satellite stereoscopic observation technology by combining ground-based, aerial, and satellite platforms across different topographic gradients and ecosystem types through terrain-specific experimental designs, and will develop the spatiotemporal scaling expansion models for complex terrains to create high-resolution reference “truth” products for Wanglang mountainous regions. The project will also develop terrain-adapted remote sensing retrieval models, and produce the world’s first set of global mountain remote sensing products featuring seven key parameters at 30m spatial resolution with monthly temporal resolution. The project is expected to propose a set of applicable technology for three-dimensional comprehensive observation of key parameters of global changes in mountain ecosystems, produce 14 kinds of key parameters and high-resolution reference “truth” products in typical mountain areas of Wanglang, and form a high-resolution product production capacity of 11 kinds of key parameters. The world’s first set of global mountain remote sensing products with 7 key parameters, 25 years (2000—2024), monthly, 30 meters high-resolution will be produced. The project is expected to promote China’s comprehensive monitoring capability of the global mountain ecosystem, and provide scientific data and technical support for research on global mountain change and the sustainable development of mountain society, especially mountain ecological environment protection, disaster prevention and reduction, agricultural production and water resources management.

Key words: mountain, global change, stereo observation, remote sensing products, high resolution

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFA0608700)