

基于多源遥感的森林变化对区域温度影响的 监测方法研究进展

沈文娟^{1,2}, 纪梅¹, 李明诗^{1,2}

(1. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: 人类活动通过改变土地覆被促成森林面积变化, 推动碳收支和地表能量平衡发生相应变化, 进而影响全球和区域尺度的气候。现有森林变化对区域温度的影响研究主要集中在有限精度的森林变化数据与温度数据结合的简单统计方法, 但高可靠度的森林变化及其生物物理过程对区域温度的影响研究表明, 准确、全面地理解森林与气候之间的生物物理相互作用机制, 能为森林生态系统的全面评估提供科学支撑。笔者综合分析了基于多源遥感的森林变化结合其生物物理过程对区域温度影响的多种监测方法, 结果发现: ①多源中高分辨率森林变化数据的有限可用性一直阻碍着对温度变化影响的精准量化; ②集成遥感观测数据的多种方法在量化森林变化的生物物理机制对于区域温度变化影响的评价不一致。因此, 森林变化的生物物理机制及其温度效应是一个值得深入分析的问题。未来需要充分发挥多种数据源合理集成后用于解释森林响应气候效应方面的交叉优势, 理解生物物理机制与生物化学机制共同作用下的森林变化、碳循环与气候的交互关系, 并通过森林生态系统的合理经营与管理实现其气候效益最大化。

关键词: 森林变化; 生物物理机制; 温度效应; 多源遥感

中图分类号: S757; TP79

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2022)03-0001-11



Review on monitoring methods of the effects of forest changes on regional temperature based on multi-source remote sensing data

SHEN Wenjuan^{1,2}, JI Mei¹, LI Mingshi^{1,2}

(1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Human activities contribute to forest changes by altering land cover, promoting changes in carbon budget and surface energy balance, further affecting climate at global and regional scales. Current studies on the impact of forest changes on regional temperature are mainly focused on the simple statistical method combining forest change data with temperature data with limited accuracy, however, studies on the effects of forest changes with high reliability and its biophysical processes on regional temperature indicate that an accurate and comprehensive understanding of the biophysical interaction mechanisms between forest and climate can provide a scientific support for the comprehensive assessment of forest ecosystems. The author made a comprehensive analysis of various monitoring methods of forest changes combined with their biophysical processes based on multi-source remote sensing on regional temperature, and found that: (1) the limited availability of high-resolution forest change data from multiple sources has been hindering the accurate quantification of the impact of temperature changes; (2) the evaluation of results about quantifying the impact of the biophysical mechanism of forest change on regional temperature based on the methods for integrating remote sensing observations is inconsistent. Therefore, the biophysical mechanism of forest change and the temperature effects are worthy

收稿日期 Received: 2021-10-22

修回日期 Accepted: 2022-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001251); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK20200781); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

第一作者: 沈文娟(wjshen@njfu.edu.cn), 副教授, 博士。

引文格式: 沈文娟, 纪梅, 李明诗. 基于多源遥感的森林变化对区域温度影响的监测方法研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 1-11. SHEN W J, JI M, LI M S. Review on monitoring methods of the effects of forest changes on regional temperature based on multi-source remote sensing data[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(3): 1-11. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202110041.

of in-depth analysis. In the future, the cross-cutting advantages of rational integration of multiple data sources to explain forest response to climate effects should be fully utilized to understand the interaction between forest change, carbon cycle and climate under biophysical and biochemical mechanisms, and to maximize climate benefits through rational management of forest ecosystems.

Keywords: forest change; biophysical mechanisms; temperature effects; multi-source remote sensing

联合国政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)第6次评估报告第一工作组报告《气候变化2021:自然科学基础》指出人类活动或气候变化导致的土地覆盖变化影响区域和全球气候,不断加剧增温趋势。其中土地利用和土地覆盖变化的生物地球化学过程通过改变陆地 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 与地表反照率导致生态系统碳收支与全球尺度的气候变化,而其生物物理过程通过陆地和大气之间重新分配能量和水汽的局部变化影响局地气候变化^[1-4]。温室气体相关的生物地球化学效应一直得到广泛研究与关注,但是对于土地利用和土地覆盖变化的生物物理过程关注较少^[5]。

与生物地球化学效应不同,生物物理过程的辐射特性(如反照率)和非辐射特性[如蒸散发(evapotranspiration, ET)和粗糙度]依赖于区域气候条件^[6-7]。例如,人们不断改变土地覆盖导致持续的森林变化,这些变化可以迅速改变地表属性和状态,如表面反照率、表面粗糙度、土壤湿度和热量储存^[8],并通过能量、水和动量通量的变化直接影响地表温度^[9]。地表温度是衡量下垫面环境变化的一个关键变量,在地表和大气之间的热量和能量交换中起着重要的作用^[10]。森林的地表反照率低而蒸散发强,与其他土地利用相比存在差异,在不同气候带、不同区域背景下对区域温度的影响程度甚至出现不同方向^[11-12]。

就森林变化监测数据与方法而言,中分辨率成像光谱仪(MODIS)及其相似分辨率土地覆盖产品在反映区域尺度的土地覆盖情况时精度较低^[13-14]。高分辨率的商业卫星数据、激光雷达(LiDAR)数据、无人机数据在单独或综合用于森林变化监测时因价格与数据同步的问题导致时空尺度的有限性^[15]。而单一时相或者多时相不连续的遥感观测方法很难精准识别一些连续的森林变化信号^[15-16]。但中高分辨率数据的时空跨度大,数据来源丰富,连续性强,应用广泛^[17-18]。中高分辨率多源数据结合的时序森林覆盖监测方法与产品已被用于量化森林变化的温度效应评价^[19-21]。尽管中高分辨率自动或半自动化时序监测算法已实

现森林变化的年份、位置与强度的定位,但它们很少能够甄别引起森林变化的具体驱动因素,特别是需要长时间序列的观测才能捕捉到的精细森林变化^[15, 22]。Prevedello等^[19]的研究指出,森林变化的精细类别影响温度的变化,但是现有数据产品较少体现多种尺度森林类型的精细分类。就森林变化及其温度效应的评价方法而言,气象站或者野外布设站点所得气象数据是最为可靠的评价数据,但通常站点较为稀疏,不能准确地定位森林覆盖动态发生区域并测报温度动态^[23-24]。以遥感观测为基础的研究可归纳为两类:一类是利用表征森林变化和气候变化的各种卫星数据集,结合点配对和单一时间的统计建模方法进行森林影响温度的区域研究,如大兴安岭^[25]、福建省^[26]、东南亚^[27]森林评估的应用;另一类是将表征森林变化的数据,如将潜在(潜在变化,即以某年森林与附近相邻土地覆盖类型构建的假设森林变化的温度差异,温度变化可发生在一定的时间跨度,而假设森林变化只选定发生在时间区间内某年的数据)或真实(真实变化,即森林变化动态发生的起始时间与温度变化的时间一致)的造林或毁林空间分布数据作为输入数据,并与遥感观测或模拟观测的陆地表面指标(如蒸散发、反照率、辐射、温度等)相结合,将原有的点尺度监测扩展到广阔的时空尺度,实现监测区域、国家乃至全球尺度的温度变化^[12, 20-21, 28]。前一种遥感观测方法完全不考虑森林变化的生物物理机制,后一种方法考虑了森林变化的生物物理机制,但没有从地表能量平衡的完整过程进行全面评估,也无法保证区域尺度生物物理机制变化的差异性与独特性。为此,笔者从集成多源遥感数据层面介绍森林变化空间分布对区域温度影响的全面评估进展,描述森林变化与温度响应数据集与森林变化监测算法的特点,以此为基础阐述森林变化的生物物理机制及其响应温度变化的多种评价方法,最后总结当前研究的不足之处并展望未来发展方向。

1 森林变化及温度响应数据集

参照国际地圈生物圈计划(IGBP)土地覆盖分类系统和国家林业局《国家森林资源连续清查技

术规定》地类划分标准,森林与非森林资源类型划分为森林(针叶林、阔叶林、竹林及其他林地)、耕地、草地、水体、建设用地以及其他地类。森林与这些其他类别的转换即为造林或毁林引起的森林空间变化。通常将森林增加与损失当作造林与毁林^[19,29],森林增加通常含有自然或半自然的森林恢复(被动),其为缓慢的过程,损失则通常较为急剧,而造林与毁林以主动的过程为主。造林被定义为通过人工植树等方式,使至少在过去 50 a(具体时间阈值 30~100 a)不曾有森林的土地转化为有林地的直接人为活动;再造林则是将过去曾经是森林但被转化为无林地的土地,转化为有林地的直接人为活动^[30]。毁林即森林覆盖的消失^[30]。因此两种说法不一致,定义不同也带来数据与识别方法差异。就明确森林变化的具体经营举措而言,因造林与毁林的经营举措诱导的森林变化,不仅包含急剧的变化,还包括缓慢的变化。

森林变化作为主导下垫面水热平衡与生物物理参数变化的主要因素,由于森林变化数据来源不同,带来了不一致的温度效应反馈^[20]。当前基于粗分辨率的土地覆盖数据被广泛应用于估测森林与温度变化的关系^[12,31]。虽然该数据能够满足大尺度模型的参数化需求,但数据本身受混合像元等因素的影响,用于估算区域尺度森林变化容易产生偏差,特别是在地形起伏较大、破碎度较高的区域^[32]。引起森林变化的众多事件,如毁林开荒、新

造林与再造林等,因其地表辐射(如地表反照率与辐射通量)与非辐射物理特征(如感热与潜热通量)不同,对区域气候的影响起到不容忽视的作用^[19,28]。然而这些精细的森林变化通常由于已有土地覆盖数据年份、精度与类别有限,无法实现准确刻画^[21]。结合上述森林变化的概念与不同森林变化关联的遥感监测数据,可见短期、不连续的数据不能完全满足森林精细变化监测的具体需求,需不断发掘出长时序、多源遥感数据量化森林变化空间模式与类型的可能性。当前用于监测森林变化的中高分辨率数据见表 1。如美国陆地卫星(Landsat)有自 20 世纪 70 年代起连续近 50 a 中高分辨率的影像^[17];日本 ALOS 卫星携带的 L 波段合成孔径雷达 PALSAR 数据可全天候对地观测,L 波段穿透力强,全球存档丰富,拥有多期数据^[33]。两种数据有相似的空间分辨率和多时相的特性,已广泛应用于区域与全球森林变化的估算与制图^[34-35]。Sentinel 数据 C 波段极化与多光谱以其多时相、穿透性等特征具有高分辨率、全天时、全天候监测森林变化的能力^[36]。各种全球尺度共享数据产品为识别时空连续的精细森林变化提供了数据参考。高分 GF-1、GF-2、环境 HJ、资源卫星、Sentinel-1、Sentinel-2 等数据尽管没有形成可共享的长时序数据集,但可为有限年份遥感数据集的构建提供训练数据,辅助长时序森林变化制图^[37-38]。

表 1 可用遥感数据与气候数据特征

Table 1 Summary of remote sensing data and climate data

类别 category	数据 data	类型 type	分辨率 resolution
遥感数据 remote sensing data	Landsat	5/7/8/9	30 m
	PALSAR	全球镶嵌数据	25 m
	其他中高分辨率数据	GF、Sentinel、worldview、RapidEye 等	米级、亚米级
	MCD43 系列	MODIS 反照率	500 m
	LST/ET/Albedo_avhrr	MODIS/HiGLASS/GLASS LST/ET/Albedo	30 m 等
气候数据 climate data	气温/降水	气象站、通量站、数据集	1 km 等
	日照	气象站、通量站、数据集	月、年
	辐射数据等	MODIS/GLASS/MERRA-1 数据	0.5°×2/3°(1 km)、小时、天
其他数据 other data	DEM	SRTM、ALOS DEM、STER GDEM	15 m、30 m、90 m

当前温度数据及其关联的陆表关键参数数据种类繁多,呈现不同的时空分辨率^[39-40]。以生态系统星载热辐射实验(ECOSTRESS)、高级量载热发射和反射辐射仪(ASTER)、Landsat 的温度数据为例^[41],其分辨率高于 MODIS 地表温度数据,但是 MODIS 数据及其衍生的地面产品种类丰富且全面,有较一致与连续的时空分辨率,是学者们在研

究森林响应气候变化时通常采用的数据产品^[42-43]。不足之处是 MODIS 产品在区域尺度呈现的精度有待提高;与温度相关的其他气候数据集(如降水、湿度、辐射等),多数存在数据精度不高和时空尺度分布不足等问题。另外,森林变化带来的气候波动往往在短期内难以监测,无法保证森林变化与温度关联的所有陆表参数数据及其时空尺

度的一致性。若既要保证森林变化对于细微变化的监测能力,又要提升对于区域温度影响评价的全面性,在区域尺度的研究中常用的方法是将中高分辨率的森林覆盖数据与来源于遥感、模拟和站点观测且反映生物物理参数的陆表数据结合从而探究森林变化对温度的影响^[6],这不可避免会带来尺度匹配的问题。目前国内外很多机构正致力于发展高精度全球尺度的遥感陆表产品实现数据标准化^[40,44]。武汉大学的 HiGLASS 项目组主要从事高分辨率全球陆地关键要素产品研究^[39-40],目前可提供的 Landsat 高分辨率 30 m 陆表关键要素产品的起始时间为 2013 年,更早期的数据则无法获取。

2 长时序森林变化的多源遥感监测算法

早期很多国家森林变化的地理信息来源于实地调查的统计数据,很难刻画其时空信息^[30]。遥感数据作为时空信息载体能发挥其判别森林变化的技术与能力优势^[20]。近年来,基于遥感数据的长时序森林变化监测算法的广泛使用提供了监测森林多种变化的可能性,一些森林变化的遥感时序监测算法见表 2。随着各种传感器的层出不穷,Landsat 为主要数据源的长时间监测算法依赖单一传感器已无法全面满足森林变化监测的多样性需求。为了弥补单一传感器对森林变化信息监测的不足,可将 Landsat 与高、中、低分辨率影像整合^[15,45]。与近似中分辨率影像结合,可充分发挥相近传感器的光谱、空间、极化等特性提高识别不同变化信息的精度^[34],也为研究区域尺度森林变

化对温度的影响提供高质量的输入数据^[28,6-51]。

集成 Landsat 与其他光学、微波数据以及特征级与决策级的方法构建层次分类常用于监测森林变化^[52]。也有学者依据光学与微波数据获取光谱波段、光谱指数、混合光谱特征、极化信息、时序光谱特征等,利用替换法与组合法等,实现森林信息的提取^[53-54]。但这些研究多提取单一时相或时间跨度大的几个不连续时间点的森林信息。基于这些信息可实现急剧的毁林变化的监测,但因时相不足很难监测渐变的森林动态。Landsat 长时序自动化或半自动化的森林变化信息监测方法与产品已被广泛应用(表 2)^[15]。这些算法以追踪光谱变化为基础成功用于监测森林变化。Liu 等^[55]基于 Landsat 和集成森林指数(IFZ)重建森林变化历史。该指数是植被变化追踪模型(VCT)的核心指标,适用于监测长时序急剧的森林干扰(如皆伐),然而对低密度的干扰(如间伐),以及缓慢的森林增加,算法敏感性不强。其他与 Landsat 相关的时序轨迹分析模型的综述见文献^[15],其主要特征见表 2,一些已被集成在了 Google Earth Engine(GEE)云平台上,如基于 Landsat 的干扰与恢复趋势监测(LandTrendr)方法^[48]、连续变化监测与分类(CCDC)方法^[50]与分离趋势和季节项的突变点(BFAST)方法^[51]。这些算法自动化程度高,能够满足长时序连续渐变监测的需求;但也存在一些不足:如容易受遥感数据云污染、物候信息提取的数据量大以及多种自定义参数设置等条件的影响,限制了这些时序监测方法在森林变化应用时的时间、空间与维度^[47-48,50-51]。

表 2 监测森林变化(>20 a)的主要遥感时序算法

Table 2 The primary time series remote sensing detection algorithms of forest changes (> 20 years)

类型 type	影像类别 category	特征变量 variable	原理 theory	特点 trait
自动化与半自动化 automatic and semi-automatic	Landsat (VCT ^[47] 、LandTrendr ^[48-49] 、CCDC ^[50] 、BFAST ^[51])	IFZ、NBR、NDVI、可见光与红外等	光谱与分类、轨迹分析、时序物候模型、趋势分析、谐波回归等	固定参数设置、数据量大、受图像质量影响大
多源数据集成 multi-source data integration	Landsat、PAISAR、Sentinel、GF	光谱、纹理、极化	单一时相推到多时相的空间分析	自动化水平待提高、尺度统一问题

此外,基于像元或者面向对象的简单机器分类方法用于森林变化监测,但其难以发挥各传感器的多特征要素组合的优势^[15,22]。Zhao 等^[56]使用 Sentinel-1 合成孔径雷达(SAR)数据结合深度学习 U-Net 方法生成两个热带毁林区域的 2017—2019 年森林采伐连续月份图像,该方法参照了 LandTrendr 算法发展的森林干扰结果,其精度可靠,充分发挥了 SAR 图像不受云雨影响且获取时

间密集的特征,但单一 SAR 数据的时序有限,无法获得更多连续的远期森林变化历史信息。众多学者使用多源遥感数据的极化与光谱特征组合构建单一时相的层次分类模型,实现时序森林动态信息提取^[35,57]。然而,这些研究并没有充分考虑反射率与光谱差异性对结果的影响,以及引起变化的经营举措与具体的变化类型。PAISAR 的微波后向散射系数对森林的生物量很敏感,可将毁林区域进

行区分^[58],但直接区分造林、再造林与已有森林的相关研究较少。Shen 等^[35]基于 Landsat 与 PALSAR 数据在分类单一时相土地覆盖数据的基础上,结合土地覆盖的造林与再造林的定义,识别已有森林与造林的多年分布。但该方法在时间连续性、多分类特征的识别与多分类器的优化以及阈值与准则的设置方面还有待改进。

3 森林变化的生物物理因素对区域温度变化影响的评价方法

将造林或毁林刻画的森林变化数据作为重要数据支撑,与温度相关的遥感、气候数据与生物物理机制等紧密结合,构建真实或潜在森林变化响应温度反馈的遥感观测方法、模式与模型,是森林变化的区域温度变化评价的重要方法。森林变化的生物物理因素对区域温度的影响主要通过点尺度气象观测、气候模式和遥感观测进行评价^[6,59-60]。直接站点观测是监测温度变化和其他地表过程参数变化的最具说服力的方法,特别适用于小区域,但其缺少机理分析^[26]。气候模式已被广泛应用于

森林变化的生物物理反馈机制对于气候影响的研究^[61],但全球气候模式更适用于大尺度的研究,因为气候模型的输入数据通常空间分辨率较粗,以及气候模型结构、物理过程和参数设定的差异,一些不确定的解释变量会给模型的结果预测带来未知性^[62],比如地球系统模型(earth system models, ESM)^[63]。多个全球气候模型研究指出由于农田取代森林致使地表反照率增加,使得北半球温带森林被毁带来降温,与其他观测方式的结果相比差异较大^[11]。区域气候模式对局地尺度有更好的适应性,如天气研究及预报模式(WRF),但区域模式未能充分认识森林变化的内在地表生物物理效应和大气反馈对区域温度变化的贡献^[64-65]。在局地尺度,气候强迫通常较为一致,或者存在外部大气的反馈。利用遥感观测(蒸散发、反照率等)或站点观测(气象站、通量塔)结合森林变化的生物物理机制及能量平衡演化模型已被用于评估森林对温度的影响^[46]。主要总结为两个集成遥感观测数据的方法,即基于气候模型及观测的方法与基于能量平衡模型及观测的方法(表3)。前者是基于气候

表3 集成遥感观测森林变化的生物物理机制主要量化方法

Table 3 The primary methods for quantifying the biophysical mechanisms of forest changes with integrated remote sensing observations

类型 type	方法 method	特点 trait	应用范围 application range
全球气候模式 global climate model	陆面过程气候影响模拟研究 ^[66] LUCID	多模式比较计划,针对历史土地利用变化对区域和全球气候的影响,通过多模式比较来确定一致的、可靠的影响,区分模式本身的变率和噪声;多种模式间关于温度变化的差别很大,更多反映出不同模式对土地覆被变化敏感性的差异;存在不能以能量变化解释的温度变化	全球毁林、土地利用类型变化等
	一般环流模式 ^[67-68] GCMS	最广泛使用的气候模型,预测大尺度大气环流对土地覆盖变化的反馈	全球土地覆盖变化
	群落气候系统模式 ^[69] community climate system	涉及地表过程的气候模式,可以作为一个独立的模块来测试土地覆盖和土地利用变化对气候的显著影响	全球土地覆盖变化
	气候模型(IPSLCM) ^[70] the institute pierre simon Laplace	由大气模式 LMDz(代表大气中基本的动力学和物理过程)与陆面模式 ORCHIDEE(代表陆地生态系统植被动态和相互作用的碳循环)组成,将观测到的海表温度(SST)和海冰(SIC)作为下边界条件。中分辨率($\sim 1^{\circ} \times 0.6^{\circ}$),粗分辨率($\sim 4^{\circ} \times 2^{\circ}$)	全国造林、全球土地覆盖变化等
区域气候模式 regional climate model	天气研究及预报模式 ^[71] WRF	短时期数值天气预报系统,模型中嵌入的陆面模型可以反映温度的昼夜循环和降水等气象特征;能表达区域问题的影响,以更好地理解陆地与大气之间的耦合关系。中尺度的区域气候模型,分辨率为 ≤ 20 km,不适用于长期气候模拟	内蒙古造林、全国造林绿化、欧洲土地覆盖变化等
	天气研究及预报模式的扩展 ^[72] CWRF	WRF的扩展,在继承WRF本身数值预报功能同时增强了对气候的模拟能力;具有多模式集合预报能力,实现多种设置组合模拟过程	我国植树造林及其他区域等
地表能量平衡模型 surface energy balance model	内在生物物理机制模型 ^[65] IBM	空气阻力与表面蒸发变化驱动的长波辐射反馈与能量再分配的结果;外部强迫和内部反馈的区分性强	内蒙古、广东及全国造林;高纬度、北美、全球土地覆盖变化等
	双抗性机制 ^[73] TRM	空气动力阻力和表面阻力控制的辐射强迫和湍流热通量	我国西北、内蒙古、美国加州、美国东南等
	直接分解温度度量机制 ^[74-75] DTM	单个能量通量;不考虑能量再分配过程;归因结果有更高的量级	内蒙古、全球土地覆盖变化等
共同之处 common		与卫星观测结合能够填补站点观测或者模型模拟的不足	

模型的敏感性实验方法,主要监测与反照率、粗糙度和蒸散发效率相关的参数,量化森林变化的辐射和非辐射效应,而气候模型在实现土地覆盖变化、作物物候的表征以及反照率和蒸散发的参数化方面有不确定性的影响^[11,63];后者是利用基于不同土地覆盖的邻近观测结果的地表能量平衡方程的分解方法,将局部地表温度变化归因于与反照率变化相关的辐射强迫,以及与地表空气动力阻力变化以及感热和潜热通量分配相关的能量再分配^[65]。无论采用哪种方法,人们逐渐关注其物理机制如何以能量收支和能量平衡来解释^[65],以及这些关键生物物理参数和气候参数如何通过遥感等观测手段获取并应用^[12,46]。

3.1 基于卫星观测数据的方法

基于 MODIS 陆表数据结合简单建模或者经验数据分析方法是分析省级及相当尺度森林与气候关联采取的主要手段^[26-27]。孙舒婷等^[25]使用 2007 年的陆地卫星 TM 热红外波段和气象数据实现大兴安岭地区的地表温度反演,仅采用简单的数据统计方法分析土地覆盖变化的多种地表机制引起的温度变化。赵彩杉等^[60]基于 Google Earth 高清影像,在 1 km 尺度上辨识了 200 对耕地与林地纯像元,进而利用 MODIS 陆地数据产品,对比分析耕地与林地的地表温度、叶面积指数、地表反照率之差,旨在全面考虑景观破碎区域的混合像元问题。

以空间换时间的方法作为一种评价森林对温度影响的进阶方法,可归纳为关注森林和邻近开阔地(如草地、农田、灌木)的温度配对点的差异,该方法具有明显的区域特征,但通常不考虑气候的差异性^[76]。主要关注假设或者潜在的造林或毁林引起森林变化的气候信号^[76],因为不局限于真实变化的区域,能够探索大范围具有相似环境条件的土地覆盖变化的温度效应^[77]。Li 等^[29]使用空间换时间方法和真实时空变化方法揭示森林变化及其蒸散发、反照率及粗糙度等特性对地表温度的影响。Shen 等^[20-21]将上述方法进行扩展后构建的移动窗口法和时空变化分析方法用于造林与毁林引起的森林变化的温度响应。其中移动窗口法是在空间换时间方法基础上的延伸;时空变化分析方法与真实时空变化方法较为相似。移动窗口采样法与空间换时间方法相比有相似之处,但空间换时间方法既识别潜在的变化又能识别真实的变化,评价所有可能发生的森林变化及其温度效应。时空变化分析方法主要适用于像元尺度或者区域尺度,倾

向于评价真实森林变化信号的温度效应,会受所获土地覆盖变化的准确性以及观测期间土地覆盖变化的频率和程度的影响^[77]。还有研究证明前述空间换时间方法和真实时空变化方法所得结果总体差异不大^[21,29]。另外,单纯依赖单时相的土地覆盖或者森林覆盖图^[12,78],以及多时相的森林变化图模拟潜在的森林变化,并没有探索真实发生的森林变化及温度的响应,特别是在区域尺度^[79]上,这可能导致对温度变化评价的差异。

此外,该进阶方法在评价森林变化的生物物理机制下温度响应时主要依赖于遥感反演或生成的温度、蒸散发、反照率、土地覆盖等数据,并利用空间采样窗口或者局地尺度的统计运算实现。虽然一些学者基于遥感观测手段成功研究了我国、欧洲、北美以及全球的森林响应温度变化^[19,29],但方法中区域与局地反照率辐射反馈、能量再分配等生物物理能量平衡机制以及气候反馈(如辐射强迫、热阻、蒸散发、土壤热通量和空气温度)是如何变化的还有待评估。

3.2 基于卫星观测、站点观测数据与气候模型的方法

不同的气候模式和陆面模式形成了针对森林变化及其区域影响的多模式计划,例如,地球系统模式、多模式计划等涵盖了植被、土壤、地表能量通量、气象等重要指标。这些模式中短波辐射、蒸散、粗糙度等是地物地表能量平衡的主要组成部分,也是地物生物物理过程的重要特性,在森林响应温度变化方面发挥重要的作用^[23,80-81]。将这些模式与观测数据结合是常用的研究手段,但也表现出了观测结果的差异性。其中国际耦合模式比较计划(coupled model intercomparison project, CMIP)是影响最大、应用最广的计划,但并不适用于土地覆盖变化的影响研究。将国际耦合模式比较计划第 5 阶段(CMIP5)和 LUCID(land use and climate: identification of robust impacts)模型方法结合的案例研究发现毁林诱导了中纬度地区夏季气温下降^[63,66]。而卫星观测的结果表明森林周边的土地带来的是夏季的增温^[12,46]。模型结果与观测结果的不一致被认为与当前陆地表面模型的参数化问题有关,例如土地利用土地覆被变化(land-use and land-cover-change, LULCC)导致的潜热通量和感热通量之间可用能量分配的变化表示陆地表面模型存在的不确定性较大,将模型与观测数据进行比较的局限性也不容忽视^[59]。因为森林变化的信号与其他气候因素容易混杂在一起,导致观测数据解析

的困难,这不同于模型模拟的森林变化场景,所以已有的观测研究主要围绕森林及其邻近区域的变化^[12,46,59,65]。另外,来源于通量塔或者卫星的观测数据通常假设森林及其邻近区域有一致的大气背景,进一步凸显了森林变化对于区域温度影响的唯一性。然而,基于气候模型的敏感性实验指出,森林变化的大气反馈(如,云与降水)在不同场景根本不同,从而使得气候模型模拟与观测研究的结果有明显冲突^[59]。此外,气候模型通常分辨率较粗,基于卫星或站点观测的方法通常运用于更精细的森林变化场景。总之,基于空间分析与比对的观测与气候模型模拟的森林响应温度变化的结果存在一定差异^[64,82]。

3.3 基于卫星观测、站点观测数据与地表能量平衡模型的方法

森林变化改变地表能量平衡从而影响温度,所以温度变化的规律与地表能量平衡关联密切^[6,9,77,83],其中辐射强迫、蒸散发、土壤热通量等的变化在很大程度上决定了温度变化的方向和程度。目前,地表能量平衡模型已被用于耕地撂荒区^[60]、退耕还林区^[84]、造林^[28]和毁林圩田区域^[62]等的温度变化研究。其中内在生物物理机制(IBM)^[65]方法结合站点观测、地表能量平衡方程作为一种常用的方法被用于森林变化或者土地利用变化造成的辐射和非辐射过程的分离^[65]。以IBM方法诠释的能量平衡方程显示,土地利用变化含森林变化对地表温度的影响是受表面长波辐射反馈以及空气动力阻力和表面蒸发变化的能量重新分配的影响,通常地表温度的变化被分离为辐射强迫、热阻、波文比及土壤热通量这些变化的主要贡献。而且还能将变化内部的强迫与外部反馈进行很好的区分。然后,Bright等^[46]将该方法与遥感观测、站点观测全面结合用于探索非辐射过程驱动下的全球土地变化对温度的影响研究;Ge等^[28]使用IBM方法,结合卫星观测并考虑背景气候的影响,分析了我国造林的气候反馈。

双抗性机制(TRM)^[73]则将地表温度的变化归因于气动阻力和表面阻力控制的辐射强迫和湍流热流的变化。Wang等^[85]针对干旱生态系统评估土地利用变化的温度效应指出,IBM法比TRM法更适用。也有研究认为这两种方法区别显著,因为假设气动阻力和波文比是独立的,IBM方法容易高估气动阻力的贡献^[86]。此外,IBM方法低估了白天辐射和蓄热的作用,但高估了夜晚的同样作用。直接分解温度度量机制(DTM)^[74-75]将地表温度的

变化归因于两类土地利用之间地表反照率、入射辐射、地面热通量、感热潜热通量的差异,是地表能量平衡和地表输出长波辐射的斯蒂芬波茨曼表达式线性化的直接结果,但是DTM方法没有考虑能量再分配的过程。

地表能量平衡模型与站点观测结合估测森林对温度的影响只能在有限地理位置开展。遥感观测弥补了站点观测的不足,三者结合提供了森林变化及其生物物理特征变化对温度影响评估的新方向^[46]。总之,以多源遥感数据为基础,空间换时间方法及相似方法结合精准的潜在森林变化或者真实森林变化,并依据表面能量通量变化估算方法,已逐渐成为量化森林精确变化从而实现温度变化响应评价的综合模式^[21,29]。

4 结论与展望

1)造林与毁林引起的精细森林变化识别,不提倡从短期、不连续的单一遥感数据中生成,建议从长时序的多源遥感数据联合构建。并将潜在或真实森林变化前后的数据输入模型与模拟方法中,实现森林变化的区域温度响应。

2)粗分辨率土地覆盖数据通常被用于大尺度森林时空变化估算,不一致的定义及单时相、粗分辨率的估算结果无法满足长时序森林变化表征的需求,在对温度影响量化时具有较高的不确定性,特别是区域尺度。

3)中分辨率光学与微波森林变化时空监测模型以单一时相有限特征估算为主,或在多源、多时相整合与协同使用时,因反射率差异、光谱不一致等导致时序数据不一致,造成估算模型响应气候变化的精度降低。

4)气候模式用在区域尺度量化森林变化的温度影响时限制较多,特别是全球气候模式,在局地与区域尺度使用时需要较为复杂的过程调整才能本土化,此外,结合地表能量平衡方程与站点观测的方法又受时空条件限制影响较大,因为发生变化的区域通常与实际观测数据不能很好地匹配。

5)使用遥感空间分析方法估算森林变化的温度影响,因未充分考虑森林变化及其辐射与非辐射过程及地气能量平衡动态,带来了量化的不确定性。

随着大数据、人工智能、云计算的广泛提及,人们越来越认识到多种大数据集成在解释森林响应气候效应方面所发挥的交叉优势,因而还有很多问题亟待去深入探讨。在以后的研究中,需要进一步

挖掘中高分辨率卫星数据的多特征分类与时序阈值准则(多光谱方面的深度特征信息、混合像元丰度、物候特征等,雷达图像方面的极化、纹理、形态学特征,LiDAR点云方面的立体信息、冠层分布等),在控制和减少时序反射率、后向散射系数与点云分类与分割差异的基础上,实现时序模型的精确构建和长时序精细森林变化分布制图。为了进一步提高长时序森林变化监测模型的精确性以及温度影响评估的一致性,可以尝试在已有研究结果的基础之上,借助现有的遥感技术、多模式模拟等大数据模式搭建,在云平台上发展长时序森林变化的精细数据集并集成遥感、站点观测与地表能量平衡模型与气候模式,深入分析不同时空尺度森林变化的生物物理效应和大气反馈(如,入射短波辐射、入射长波辐射和背景空气温度)进而评估它们对能量通量和水热平衡的影响机制^[77,87],并紧密结合森林生态系统的碳源汇对气候的影响,合理评价生物化学机制与生物物理机制共同作用下的森林变化、碳循环与气候的交互关系^[9,83],为我国人工林区及相似地理区域以及丝绸之路沿线国家通过森林生态系统合理经营与管理,实现气候效益最大化提供科学理论与方法指导。

参考文献(reference):

- [1] 华文剑,陈海山,李兴.中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述[J].地球科学进展,2014,29(9):1025-1036. HUA W J, CHEN H S, LI X. Review of land use and land cover change in China and associated climatic effects[J]. Adv Earth Sci, 2014, 29(9): 1025-1036. DOI: 10.11867/j. issn. 1001-8166. 2014. 09. 1025.
- [2] 刘纪远,邵全琴,黄麟.大尺度土地利用变化对全球气候的影响[J].中国基础科学,2015,17(3):32-39. LIU J Y, SHAO Q Q, HUANG L. Researches on the impacts of large-scale land use change on global climate[J]. China Basic Sci, 2015, 17(3): 32-39. DOI: 10.3969/j. issn. 1009-2412. 2015. 03. 006.
- [3] CHEN C, PARK T, WANG X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nat Sustain, 2019, 2: 122-129. DOI: 10.1038/s41893-019-0220-7.
- [4] SONG X P, HANSEN M C, STEHMAN S V, et al. Global land change from 1982 to 2016[J]. Nature, 2018, 560(7720): 639-643. DOI: 10.1038/s41586-018-0411-9.
- [5] ALKAMA R, CESCATTI A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover[J]. Science, 2016, 351(6273): 600-604. DOI: 10.1126/science.aac8083.
- [6] MAHMOOD R, PIELKE SR R A, HUBBARD K G, et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate[J]. Int J Climatol, 2014, 34(4): 929-953. DOI: 10.1002/joc.3736.
- [7] PERUGINI L, CAPORASO L, MARCONI S, et al. Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change[J]. Environ Res Lett, 2017, 12(5): 053002. DOI: 10.1088/1748-9326/aa6b3f.
- [8] PIELKE SR R A, PITMAN A, NIYOGI D, et al. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence[J]. Wiley Interdiscip Rev Clim Change, 2011, 2(6): 828-850. DOI: 10.1002/wcc.144.
- [9] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. Science, 2008, 320(5882): 1444-1449. DOI: 10.1126/science.1155121.
- [10] LI Z L, TANG B H, WU H, et al. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives[J]. Remote Sens Environ, 2013, 131: 14-37. DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
- [11] DAVIN E L, DE NOBLET-DUCOUDRÉ N. Climatic impact of global-scale deforestation: radiative versus nonradiative processes[J]. J Clim, 2010, 23(1): 97-112. DOI: 10.1175/2009jcli3102.1.
- [12] LI Y, ZHAO M S, MOTESHARREI S, et al. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations[J]. Nat Commun, 2015, 6: 6603. DOI: 10.1038/ncomms7603.
- [13] 朱若柠,沈文娟,张亚丽,等.基于时间序列MODIS-VCF数据的云南省森林覆盖变化及破碎化分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(2):184-190. ZHU R N, SHEN W J, ZHANG Y L, et al. Assessing changes in forest coverage and forest fragmentation patterns in Yunnan Province from time series MODIS-VCF products(2000-2016)[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2019, 43(2): 184-190. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-2006. 201805001.
- [14] 沈文娟,徐婷,李明诗.中国三大林区森林破碎化及干扰模式变动分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(4):75-79. SHEN W J, XU T, LI M S. Spatio-temporal changes in forest fragmentation, disturbance patterns over the three giant forested regions of China[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2013, 37(4): 75-79.
- [15] 沈文娟,李明诗,黄成全.长时间序列多源遥感数据的森林干扰监测算法研究进展[J].遥感学报,2018,22(6):1005-1022. SHEN W J, LI M S, HUANG C Q. Review of remote sensing algorithms for monitoring forest disturbance from time series and multi-source data fusion[J]. J Remote Sens, 2018, 22(6): 1005-1022.
- [16] 贾小凤,朱红春,凌峰,等.基于Landsat多光谱与PALSAR/PALSAR-2数据的汉江流域森林覆盖变化研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):321-329. JIA X F, ZHU H C, LING F, et al. Forest cover monitoring and its changes in Hanjiang River Basin based on landsat multispectral and PALSAR/PALSAR-2 data[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 2021, 30(2): 321-329. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202102007.
- [17] HANSEN M C, POTAPOV P V, MOORE R, et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change[J]. Science, 2013, 342(6160): 850-853. DOI: 10.1126/science.1244693.
- [18] LIANG S, WANG J. Forest cover changes: mapping and climatic impact assessment[M]. New York: Academic Press, 2020: 915-952.
- [19] PREVEDELLO J A, WINCK G R, WEBER M M, et al. Impacts of forestation and deforestation on local temperature across the globe[J]. PLoS One, 2019, 14(3): e0213368. DOI: 10.1371/journal.pone.0213368.
- [20] SHEN W J, HE J Y, HUANG C Q, et al. Quantifying the actual impacts of forest cover change on surface temperature in Guangdong, China[J]. Remote Sens, 2020, 12(15): 2354. DOI: 10.

- 3390/rs12152354.
- [21] SHEN W J, LI M S, HUANG C Q, et al. Local land surface temperature change induced by afforestation based on satellite observations in Guangdong plantation forests in China [J]. *Agric For Meteorol*, 2019, 276/277: 107641. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107641.
- [22] 黄春波, 佃袁勇, 周志翔, 等. 基于时间序列统计特性的森林变化监测[J]. *遥感学报*, 2015, 19(4): 657–668. HUANG C B, DIAN Y Y, ZHOU Z X, et al. Forest change detection based on time series images with statistical properties [J]. *J Remote Sens*, 2015, 19(4): 657–668. DOI: 10.11834/jrs.20154104.
- [23] ARORA V K, MONTENEGRO A. Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts [J]. *Nat Geosci*, 2011, 4(8): 514–518. DOI: 10.1038/ngeo1182.
- [24] BONAN G B. Effects of land use on the climate of the United States [J]. *Clim Change*, 1997, 37(3): 449–486. DOI: 10.1023/A:1005305708775.
- [25] 孙舒婷, 范文义, 张智超. 大兴安岭森林地表温度的遥感估算及分析研究[J]. *森林工程*, 2015, 31(3): 35–39. SUN S T, FAN W Y, ZHANG Z C. Remote sensing estimation analysis of land surface temperature in Greater Khingan Mountains forest [J]. *For Eng*, 2015, 31(3): 35–39. DOI: 10.16270/j.cnki.slgc.2015.03.009.
- [26] 徐凯健, 曾宏达, 张仲德, 等. 亚热带福建省森林生长季与气温、降水相关性的遥感分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(10): 1249–1259. XU K J, ZENG H D, ZHANG Z D, et al. Relating forest phenology to temperature and precipitation in the subtropical region of Fujian based on time-series MODIS-NDVI [J]. *J Geo Inf Sci*, 2015, 17(10): 1249–1259. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.01249.
- [27] 尹思阳, 吴文瑾, 李新武. 基于遥感和气象数据的东南亚森林动态变化分析[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(1): 166–175. YIN S Y, WU W J, LI X W. Analysis of the forest dynamic changes in Southeast Asia based on remote sensing and meteorological data [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 2019, 34(1): 166–175. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.1.0166.
- [28] GE J, GUO W D, PITMAN A J, et al. The nonradiative effect dominates local surface temperature change caused by afforestation in China [J]. *J Clim*, 2019, 32(14): 4445–4471. DOI: 10.1175/jcli-d-18-0772.1.
- [29] LI Y, ZHAO M S, MILDREXLER D J, et al. Potential and actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(24): 14372–14386. DOI: 10.1002/2016JD024969.
- [30] 张小全, 侯振宏. 森林、造林、再造林和毁林的定义与碳计量问题[J]. *林业科学*, 2003(2): 145–152. ZHANG X Q, HOU Z H. Definitions of afforestation, reforestation and deforestation in relations to carbon accounting [J]. *Sci Silvae Sin*, 2003(2): 145–152.
- [31] 冯海英, 冯仲科. 基于 MODIS LST 产品的山东省森林调节温度生态服务价值评估新方法[J]. *林业科学*, 2018, 54(2): 10–17. FENG H Y, FENG Z K. A new method of valuating the ecological service of temperature regulation of forests in Shangdong Province based on MODIS LST products [J]. *Sci Silvae Sin*, 2018, 54(2): 10–17. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20180202.
- [32] 胡茂桂, 王劲峰. 遥感影像混合像元分解及超分辨率重建研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(6): 747–756. HU M G, WANG J F. Mixed-pixel decomposition and super-resolution reconstruction of RS image [J]. *Prog Geogr*, 2010, 29(6): 747–756.
- [33] SHIMADA M, ITOH T, MOTOOKA T, et al. New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010) [J]. *Remote Sens Environ*, 2014, 155: 13–31. DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.014.
- [34] REICHE J, LUCAS R, MITCHELL A L, et al. Combining satellite data for better tropical forest monitoring [J]. *Nature Clim Change*, 2016, 6(2): 120–122. DOI: 10.1038/nclimate2919.
- [35] SHEN W J, LI M S, HUANG C Q, et al. Mapping annual forest change due to afforestation in Guangdong Province of China using active and passive remote sensing data [J]. *Remote Sens*, 2019, 11(5): 490. DOI: 10.3390/rs11050490.
- [36] 刘睿, 王志勇, 高瑞. 时序 SAR 影像的干旱地区土地利用分类应用[J]. *测绘科学*, 2021, 46(10): 90–97. LIU R, WANG Z Y, GAO R. Application of time series SAR image in land use classification in arid area [J]. *Sci Surv Mapp*, 2021, 46(10): 90–97. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.10.013.
- [37] LIU Y N, GONG W S, HU X Y, et al. Forest type identification with random forest using sentinel-1A, sentinel-2A, multi-temporal landsat-8 and DEM data [J]. *Remote Sens*, 2018, 10(6): 946. DOI: 10.3390/rs10060946.
- [38] 侍昊, 沈文娟, 李杨, 等. 高分系列卫星影像特征及其在太湖生态环境监测中的应用[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(6): 63–68. SHI H, SHEN W J, LI Y, et al. Characteristics of GF images and application in eco-environmental monitoring in Taihu Lake [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2016, 40(6): 63–68. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.06.010.
- [39] LIANG S L, CHENG J, JIA K, et al. The global land surface satellite (GLASS) product suite [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 2021, 102(2): 323–337. DOI: 10.1175/bams-d-18-0341.1.
- [40] 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述[J]. *遥感学报*, 2020, 24(6): 618–671. LIANG S L, BAI R, CHEN X N, et al. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019 [J]. *J Remote Sens*, 2020, 24(6): 618–671.
- [41] SILVESTRI M, ROMANIELLO V, HOOK S, et al. First comparisons of surface temperature estimations between ECOSTRESS, ASTER and Landsat 8 over Italian volcanic and geothermal areas [J]. *Remote Sens*, 2020, 12(1): 184. DOI: 10.3390/rs12010184.
- [42] GENG L Y, MA M G, YU W P, et al. Validation of the MODIS NDVI products in different land-use types using *in situ* measurements in the Heihe River basin [J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2014, 11(9): 1649–1653. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2314134.
- [43] SONG Z J, LI R H, QIU R Y, et al. Global land surface temperature influenced by vegetation cover and PM_{2.5} from 2001 to 2016 [J]. *Remote Sens*, 2018, 10(12): 2034. DOI: 10.3390/rs10122034.
- [44] JUSTICE C O, TOWNSHEND J R G, VERMOTE E F, et al. An overview of MODIS land data processing and product status [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, 83(1/2): 3–15. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6.
- [45] 徐辉, 潘萍, 杨武, 等. 基于多源遥感影像的森林资源分类及精度评价[J]. *江西农业大学学报*, 2019, 41(4): 751–760. XU H, PAN P, YANG W, et al. Classification and accuracy evaluation of forest resources based on multi-source remote sensing images [J]. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2019, 41(4): 751–760. DOI: 10.

- 13836/j.jjau.2019087.
- [46] BRIGHT R M, DAVIN E, O' HALLORAN T, et al. Local temperature response to land cover and management change driven by non-radiative processes[J]. *Nat Clim Chang*, 2017, 7(4): 296–302. DOI: 10.1038/nclimate3250.
- [47] HUANG C Q, GOWARD S N, MASEK J G, et al. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks[J]. *Remote Sens Environ*, 2010, 114(1): 183–198. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.017.
- [48] KENNEDY R E, YANG Z Q, COHEN W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. Land Trendr: temporal segmentation algorithms[J]. *Remote Sens Environ*, 2010, 114(12): 2897–2910. DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.
- [49] 沈文娟, 李明诗. 基于长时间序列 Landsat 影像的南方人工林干扰与恢复制图分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1438–1449. SHEN W J, LI M S. Mapping disturbance and recovery of plantation forests in southern China using yearly Landsat time series observations[J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(5): 1438–1449. DOI: 10.5846/stxb201510142074.
- [50] ZHU Z, WOODCOCK C E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data[J]. *Remote Sens Environ*, 2014, 144: 152–171. DOI: 10.1016/j.rse.2014.01.011.
- [51] DEVRIES B, VERBESSELT J, KOOISTRA L, et al. Robust monitoring of small-scale forest disturbances in a tropical montane forest using Landsat time series[J]. *Remote Sens Environ*, 2015, 161: 107–121. DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.012.
- [52] BELGIU M, STEIN A. Spatiotemporal image fusion in remote sensing[J]. *Remote Sens*, 2019, 11(7): 818. DOI: 10.3390/rs11070818.
- [53] 任冲, 鞠洪波, 张怀清, 等. 多源数据林地类型的精细分类方法[J]. *林业科学*, 2016, 52(6): 54–65. REN C, JU H B, ZHANG H Q, et al. Multi-source data for forest land type precise classification[J]. *Sci Silvae Sin*, 2016, 52(6): 54–65. DOI: 10.11707/j.1001–7488.20160607.
- [54] 张晓羽, 李凤日, 甄贞, 等. 基于随机森林模型的陆地卫星-8 遥感影像森林植被分类[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(6): 53–57, 74. ZHANG X Y, LI F R, ZHEN Z, et al. Forest vegetation classification of Landsat 8 remote sensing image based on random forests model[J]. *J Northeast For Univ*, 2016, 44(6): 53–57, 74. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2016.06.005.
- [55] LIU L Y, TANG H, CACCETTA P, et al. Mapping afforestation and deforestation from 1974 to 2012 using Landsat time-series stacks in Yulin District, a key region of the Three-North Shelter region, China[J]. *Environ Monit Assess*, 2013, 185(12): 9949–9965. DOI: 10.1007/s10661–013–3304–2.
- [56] ZHAO F, SUN R, ZHONG L H, et al. Monthly mapping of forest harvesting using dense time series Sentinel-1 SAR imagery and deep learning[J]. *Remote Sens Environ*, 2022, 269: 112822. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112822.
- [57] QIN Y, XIAO X, DONG J, et al. Improved estimates of forest cover and loss in the Brazilian Amazon in 2000–2017[J]. *Nat Sustain*, 2019, 2(8): 764–772. DOI: 10.1038/s41893–019–0336–9.
- [58] MIZUOCHI H, HAYASHI M, TADONO T. Development of an operational algorithm for automated deforestation mapping via the Bayesian integration of long-term optical and microwave satellite data[J]. *Remote Sens*, 2019, 11(17): 2038. DOI: 10.3390/rs11172038.
- [59] CHEN L, DIRMEYER P A. Reconciling the disagreement between observed and simulated temperature responses to deforestation[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 202. DOI: 10.1038/s41467–019–14017–0.
- [60] 赵彩杉, 曾刚, 张丽娟, 等. 基于 Google Earth 和 MODIS 陆地数据的农林地转换对地表温度的影响: 以长江中下游及毗邻地区为例[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(5): 698–708. ZHAO C S, ZENG G, ZHANG L J, et al. Effects of cropland and woodland conversion on land surface temperature based on Google Earth and MODIS land data: a case study of the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and its adjacent areas[J]. *Prog Geogr*, 2019, 38(5): 698–708.
- [61] 孙云, 于德永, 曹茜, 等. 土地利用/土地覆盖变化对区域气候影响的生物地球物理途径研究进展[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(2): 189–196. SUN Y, YU D Y, CAO Q, et al. Review on the biogeophysical effects of changes in land use and land cover on regional climate: research progress[J]. *J Beijing Norm Univ (Nat Sci)*, 2015, 51(2): 189–196. DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2015.02.016.
- [62] HE T, SHAO Q Q, CAO W, et al. Satellite-observed energy budget change of deforestation in northeastern China and its climate implications[J]. *Remote Sens*, 2015, 7(9): 11586–11601. DOI: 10.3390/rs70911586.
- [63] PITMAN A J, DE NOBLET-DUCOUDRÉ N, CRUZ F T, et al. Uncertainties in climate responses to past land cover change: first results from the LUCID intercomparison study[J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36(14): L14814. DOI: 10.1029/2009GL039076.
- [64] YU L X, ZHANG S W, TANG J M, et al. The effect of deforestation on the regional temperature in northeastern China[J]. *Theor Appl Climatol*, 2015, 120(3/4): 761–771. DOI: 10.1007/s00704–014–1186–z.
- [65] LEE X H, GOULDEN M L, HOLLINGER D Y, et al. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes[J]. *Nature*, 2011, 479(7373): 384–387. DOI: 10.1038/nature10588.
- [66] DE NOBLET-DUCOUDRÉ N, BOISIER J P, PITMAN A, et al. Determining robust impacts of land-use-induced land cover changes on surface climate over north America and Eurasia: results from the first set of LUCID experiments[J]. *J Climate*, 2012, 25(9): 3261–3281. DOI: 10.1175/jcli-d-11–00338.1.
- [67] BAIDYA ROY S, HURTT G C, WEAVER C P, et al. Impact of historical land cover change on the July climate of the United States[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2003, 108(D24): 4793. DOI: 10.1029/2003JD003565.
- [68] COOLEY H S, RILEY W J, TORN M S, et al. Impact of agricultural practice on regional climate in a coupled land surface mesoscale model[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2005, 110(D3): D03113. DOI: 10.1029/2004JD005160.
- [69] COLLINS W D, BITZ C M, BLACKMON M L, et al. The community climate system model Version 3 (CCSM3)[J]. *J Clim*, 2006, 19(11): 2122–2143. DOI: 10.1175/jcli3761.1.
- [70] DUFRESNE J L, FOUJOLS M A, DENVIL S, et al. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP₃ to CMIP₅[J]. *Clim Dyn*, 2013, 40(9/10): 2123–2165. DOI: 10.1007/s00382–012–1636–1.
- [71] ZENG X M, WU Z H, XIONG S Y, et al. Sensitivity of simulated short-range high-temperature weather to land surface schemes by

- WRF[J]. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54(4): 581–590. DOI: 10.1007/s11430-011-4181-6.
- [72] LIANG X Z, XU M, YUAN X, et al. Regional climate-weather research and forecasting model[J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 2012, 93(9): 1363–1387. DOI: 10.1175/bams-d-11-00180.1.
- [73] RIGDEN A J, LI D. Attribution of surface temperature anomalies induced by land use and land cover changes[J]. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(13): 6814–6822. DOI: 10.1002/2017GL073811.
- [74] JUANG J Y, KATUL G, SIQUEIRA M, et al. Separating the effects of albedo from eco-physiological changes on surface temperature along a successional chronosequence in the southeastern United States[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(21): L21408. DOI: 10.1029/2007GL031296.
- [75] LUYSSAERT S, JAMMET M, STOY P C, et al. Land management and land-cover change have impacts of similar magnitude on surface temperature[J]. *Nat Clim Chang*, 2014, 4(5): 389–393. DOI: 10.1038/nclimate2196.
- [76] ZHAO K G, JACKSON R B. Biophysical forcings of land-use changes from potential forestry activities in north America[J]. *Ecol Monogr*, 2014, 84(2): 329–353. DOI: 10.1890/12-1705.1.
- [77] DUVEILLER G, HOOKER J, CESCATTI A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance[J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 679. DOI: 10.1038/s41467-017-02810-8.
- [78] PENG S S, PIAO S L, ZENG Z Z, et al. Afforestation in China cools local land surface temperature[J]. *PNAS*, 2014, 111(8): 2915–2919. DOI: 10.1073/pnas.1315126111.
- [79] TANG B J, ZHAO X, ZHAO W Q. Local effects of forests on temperatures across Europe[J]. *Remote Sens*, 2018, 10(4): 529. DOI: 10.3390/rs10040529.
- [80] LI Y, PIAO S L, CHEN A P, et al. Local and teleconnected temperature effects of afforestation and vegetation greening in China[J]. *Natl Sci Rev*, 2019, 7(5): 897–912. DOI: 10.1093/nsr/nwz132.
- [81] LIAO W L, LIU X P, BURAKOWSKI E, et al. Sensitivities and responses of land surface temperature to deforestation-induced biophysical changes in two global earth system models[J]. *J Clim*, 2020, 33(19): 8381–8399. DOI: 10.1175/jcli-d-19-0725.1.
- [82] WICKHAM J D, WADE T G, RIITTERS K H. Empirical analysis of the influence of forest extent on annual and seasonal surface temperatures for the continental United States[J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2013, 22(5): 620–629. DOI: 10.1111/geb.12013.
- [83] ANDERSON R G, CANADELL J G, RANDERSON J T, et al. Biophysical considerations in forestry for climate protection[J]. *Front Ecol Environ*, 2011, 9(3): 174–182. DOI: 10.1890/090179.
- [84] 黄麟, 翟俊, 宁佳. 不同气候带退耕还林对区域气温的影响差异分析[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(11): 1832–1843. HUANG L, ZHAI J, NING J. Impacts of returning farmland to forest on regional air temperature in different climatic zones[J]. *J Nat Resour*, 2017, 32(11): 1832–1843. DOI: 10.11849/zrzyxb.20161061.
- [85] WANG L M, TIAN F Q, WANG X F, et al. Attribution of the land surface temperature response to land-use conversions from bare land[J]. *Glob Planet Change*, 2020, 193: 103268. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103268.
- [86] LIAO W L, RIGDEN A J, LI D. Attribution of local temperature response to deforestation[J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2018, 123(5): 1572–1587. DOI: 10.1029/2018JG004401.
- [87] JACH L, WARRACH-SAGI K, INGWERSEN J, et al. Land cover impacts on land-atmosphere coupling strength in climate simulations with WRF over Europe[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2020, 125(18): e2019JD031989. DOI: 10.1029/2019JD031989.

(责任编辑 吴祝华)