

FARSITE 和 Cell2Fire 森林火灾蔓延模拟系统对比及重初始化研究

辛淇¹, 袁媛², 周君晗¹, 李子扬³, 周增光³

1. 南京邮电大学 物联网学院, 南京 210000;
2. 南京邮电大学 计算机学院, 南京 210000;
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101

摘要: 基于遥感数据的林火蔓延模拟是根据遥感技术获取可燃物、地形和火点等数据, 结合林火蔓延模拟模型预测森林火灾蔓延态势的方法, 对森林防火救灾工作具有重要参考意义。本文使用 Cell2Fire 和 FARSITE 两种林火蔓延模拟器, 对四川省凉山和内蒙古自治区那吉林场的两场森林火灾进行模拟, 对比了两种模拟器模拟精度。同时, 针对连续模拟精度不高的问题, 提出一种基于 BAI 光谱指数与区域生长的过火区重初始化方法, 能够自动提取过火区, 结合卫星火点数据重初始化林火蔓延模拟器, 进而提高连续多天的模拟精度。实验结果表明: (1) FARSITE 和 Cell2Fire 模拟结果较为相似, 大多数情况下 FARSITE 模拟精度略高于 Cell2Fire; (2) 与连续模拟和 VIIRS 重初始化模拟方法相比, 所提出的过火区重初始化方法能改善长时间模拟误差累积问题和因缺少前期火点导致的模拟不充分问题, 使用过火区重初始化方法的 Cell2Fire 和 FARSITE 模拟结果精度最高, 说明对于提高模拟结果准确性来说, 选择合适的模拟方法可能比选择模拟器更重要。

关键词: FARSITE, Cell2Fire, VIIRS, 森林火灾, 火灾模拟, “5·7”凉山森林火灾, “5·17”那吉林场森林火灾
中图分类号: P237/P2

引用格式: 辛淇, 袁媛, 周君晗, 李子扬, 周增光. 2025. FARSITE 和 Cell2Fire 森林火灾蔓延模拟系统对比及重初始化研究. 遥感学报, 29(4): 945-957

Xin Q, Yuan Y, Zhou J H, Li Z Y and Zhou Z G. 2025. Comparative analysis of forest fire spread simulation and reinitialization methods based on FARSITE and Cell2Fire. National Remote Sensing Bulletin, 29(4): 945-957 [DOI: 10.11834/jrs.20244035]

1 引言

森林火灾作为一种严重的自然灾害, 不仅造成生命和财产安全损失, 而且还对土壤、森林、生物多样性以及野生动植物等自然资源造成严重破坏 (Ghali 和 Akhloufi, 2023)。因此, 高效、准确地模拟森林火灾的蔓延情况, 可以了解当前火灾状况, 快速掌握火灾蔓延趋势, 为制定高效的灭火提供科学支持 (Sun 等, 2021)。

传统林火蔓延理论模型根据是否考虑热传导机制可划分为物理模型、经验模型和半经验模型。物理模型考虑燃烧的化学过程和热传导的物理

过程 (Fons, 1946; Albini, 1985), 但输入参数难以采集, 对数据计算要求高, 计算复杂。经验模型则根据实际数据的收集和统计分析建立模型方程 (Cheney 等, 1998), 相比于物理模型更适合要求更低速度更快的实时计算, 其中典型模型是加拿大林火行为预测模型 FBP (Canadian Forest Fire Behavior Prediction) (Stocks 等, 1989)。半经验模型结合了物理模型和经验模型的特点, 基于一些基础的物理理论指导统计分析, 减少了经验模型建模过程中数据集规模和个人主观因素的影响 (Sullivan, 2009), 典型代表是 Rothermel 模型 (Rothermel, 1972)。

收稿日期: 2024-01-31; 预印本: 2024-04-16

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2021YFC3000302); 国家自然科学基金 (编号: 41901356); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (编号: KYCX23_1069)

第一作者简介: 辛淇, 研究方向为林火蔓延模拟、时间序列异常检测。E-mail: 1022173213@njupt.edu.cn

通信作者简介: 周增光, 研究方向为时序数据分析。E-mail: zhouzg@aircas.ac.cn

林火蔓延模拟是在林火蔓延理论模型的基础上,采用计算机模拟算法,对林火的动态发展过程进行预测的方法(Papadopoulos和Pavlidou, 2011)。目前已经开发了许多林火蔓延模拟器,如FARSITE, Prometheus, Nexus和FlamMap等(Cardil等, 2019)。其中, FARSITE基于Rothermel模型计算林火蔓延速率,是目前大多数研究学者认为最精确的火灾蔓延模拟器(Kudláčková等, 2024; Mitchell等, 2023; Yoo和Song, 2023)。国内已有研究利用FARSITE模拟中国境内的森林火灾。例如,吴志伟等(2012)将FARSITE应用于丰林自然保护区林火行为预测,编制了潜在林火行为空间区划图。赵璠等(2017)使用FARSITE和Prometheus模拟中国西南林区森林火灾,实验结果表明FARSITE的蔓延范围、蔓延速度和火线强度的模拟结果与实际情况最接近。唐丽玉等(2015)从技术层面将基于FARSITE的林火蔓延模拟进行三维可视化。

Cell2Fire是Pais等(2021)于2019年开发的一款新的森林火灾蔓延模拟器,基于FBP模型计算火灾蔓延速率(Carrasco等, 2019)。与FARSITE不同的是, Cell2Fire是基于元胞结构的开源模拟器,利用并行方式来支持大尺度的空间和时间的火灾蔓延模拟。Pais等(2021)比较了Cell2Fire和Prometheus的林火蔓延模拟结果,认为两种模拟器的模拟精度非常接近,而Cell2Fire模拟速度明显更快,因此更适合需要多次模拟的大型森林火灾。但Cell2Fire在标准可燃物以及参数设置等方面与FARSITE不同,且目前国内还没有使用Cell2Fire模拟国内森林火灾的研究先例,需要评估其在中国森林火灾蔓延模拟中的模拟效果并与FARSITE进行比较。

林火蔓延模拟精度不仅受到不同模拟器的影响,还会受不同模拟方法的影响。传统的连续模拟方法更依赖于模拟器的初始设定,在进行长时间林火蔓延模拟时通常会出现模拟误差随模拟时间增加而增大的现象,导致模拟精度较低(Papadopoulos和Pavlidou, 2011)。而重初始化方法在模拟过程中通过不断重塑火灾蔓延形态,有效减少模拟过程和实际情况的差异,帮助模拟器正确模拟火情发展。现有研究一般使用两种方法进行林火蔓延模拟算法的重初始化:一种是利用MODIS或VIIRS等卫星的热异常点作为火点重新更正火灾起始和蔓延位置(Sá等, 2017; Cardil等,

2019);另一种则是使用遥感产品不断获得实际过火区信息,将实际过火区设为不可燃区域从而限制模拟火灾蔓延范围,例如徐奔奔等(2022)使用VIIRS火点数据结合人工目视解译的遥感监测过火区数据,重初始化模拟了中国内蒙古自治区森林火灾,证明这种方法能提高林火蔓延模拟器在大规模、长时间森林火灾预测中的可靠性。相比于仅利用火点数据重初始化模拟,使用火灾发生期间的过火区数据重初始化模拟能使模拟器及时更新状态,适应当前火势的变化,从而减少误差累积。然而,通过人工目视解译获得过火区的方法自动化程度低,难以满足实际火灾模拟的实时性要求,因此有必要研究更加自动、可靠的过火区提取方法。

由于对火烧植被光谱信息变化敏感,一些针对火灾的光谱指数如BAI(Burned Area Index)和NBR(Normalized Burn Ratio)等已被广泛应用于识别过火区(Mpakairi等, 2020; Liu等, 2021; Laneve等, 2024)。其中, NBR需要短波红外波段信息,而BAI只需要红波段和近红外波段信息,因此BAI适用于绝大部分中高分辨率卫星遥感数据的过火区植被信息获取。基于光谱指数计算阈值可自动提取过火区(Bataineh等, 2011; Lasaponara和Tucci, 2019; 饶月明等, 2020),其中广泛使用的简单阈值计算方法包括全局阈值法OTSU(Otsu, 1979)和ISODATA(Bezdek, 1980),以及局部阈值法Niblack(Niblack, 1985)和Sauvola(Sauvola和Pietikäinen, 2000)。但是,直接使用光谱指数阈值提取过火区容易获取非过火区细小图斑。区域生长方法能够结合过火区像素信息和阈值设定种子和生长规则,可排除非目标干扰像素并快速准确识别过火区,已被广泛应用于过火区的提取(Hawbaker等, 2017; Yuan等, 2020; Sali等, 2021)。

本文基于FARSITE和Cell2Fire两种模拟器,使用VIIRS火点数据和遥感监测数据,模拟了2017年内蒙古“5·17”那吉林场森林火灾和2020年四川“5·7”凉山森林火灾蔓延情况。同时,提出一种基于BAI光谱指数与区域生长提取过火区进行重初始化模拟的方法。本文对比了FARSITE和Cell2Fire分别使用(1)连续模拟,(2)VIIRS重初始化模拟,(3)过火区重初始化模拟3种方法对两场火灾的模拟精度,研究结论可为中国的森林火灾防治工作提供参考。

2 研究方法

2.1 研究区概况

本文选取2020年四川“5·7”凉山森林火灾和2017年内蒙古“5·17”那吉林场森林火灾进行模拟,如图1、图2和表1所示,两场火灾分别位于中国西南和东北地区,具有不同地形、气象、可燃物等火灾影响因素以及不同的火灾规模,可以更好地比较

Cell2Fire 和 FARSITE 对中国森林火灾的模拟效果。“5·7”凉山森林火灾发生于2020年5月7日17时,火灾持续4 d,火场中心点经纬度为28°14′N, 102°14′E,过火面积约600 ha,林区主要植被类型为云南松林和青冈林;“5·17”那吉林场森林火灾发生于2017年5月17日11时,火灾持续3 d,火场中心点经纬度为49°55′N, 120°51′E,过火面积约1.2万 ha,林区主要植被类型为桦树林和草地。

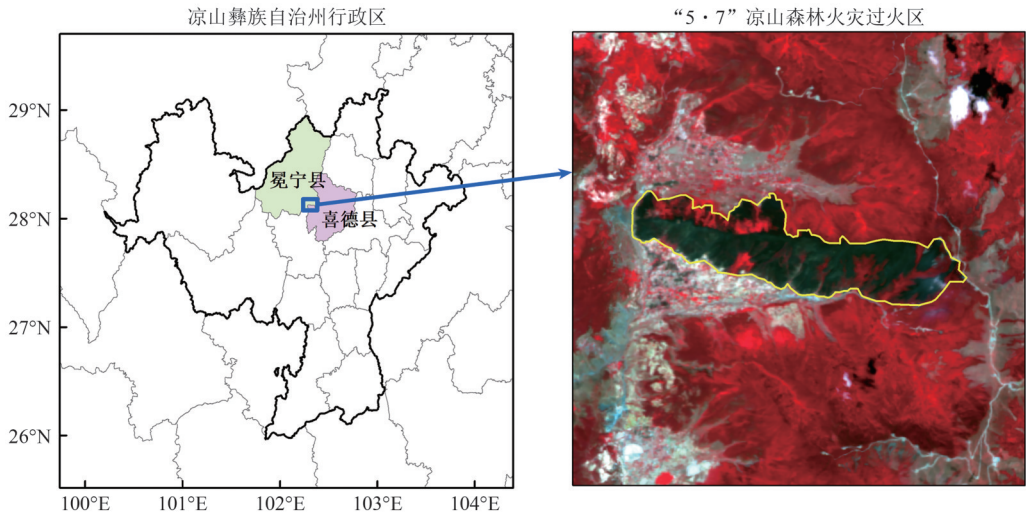


图1 凉山研究区位置示意图
Fig. 1 Location of the Liangshan study area

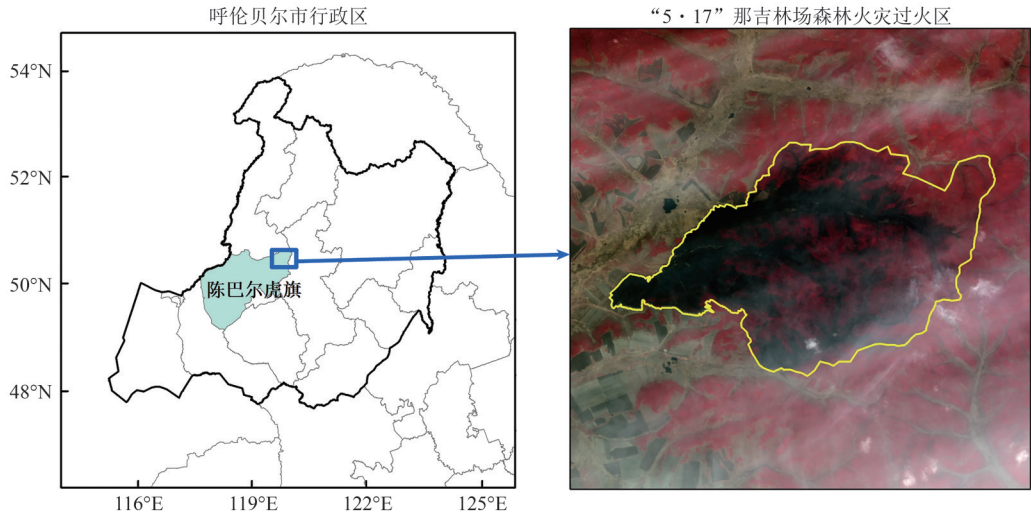


图2 那吉林场研究区位置示意图
Fig. 2 Location of the Naji study area

表1 研究区输入数据情况

Table 1 The basic situation of the study area					
研究区	气象站	平均温度/℃	平均风速/(km/h)	平均海拔/km	植被类型数据来源
凉山研究区	XICHANG (56571)	26.2	8.57	2.65	2017年10 m 全球地表覆盖数据 (https://data-starecloud.pcl.ac.cn/[2024-01-31])
那吉林场研究区	TULIHE (50434)	13.4	15.38	0.87	

GF-1/WFV 数据监督分类

2.2 模拟器输入数据及参数设定

Cell2Fire和FARSITE必要输入数据均包括地形、气象和可燃物数据。对于输入地形数据，FARSITE和Cell2Fire需要模拟区域的高程、坡度和坡向数据。对于输入气象数据，FARSITE和Cell2Fire需要每小时温度、湿度、风速、风向、降水量、云量等数据。对于输入可燃物数据，FARSITE和Cell2Fire需要输入模拟区域的可燃物分布数据，但二者标准可燃物模型不同，FARSITE的标准可燃物模型为Anderson和Scott可燃物模型，而Cell2Fire为FBP可燃物模型。本文中可燃物模型参考了西南林区及那吉林场研究区已有的研究结果（赵璠等，2017；徐奔奔等，2022），可燃物植被类型对应的可燃物模型代码及名称如表2所示。此外，FARSITE还需要输入植被覆盖度数据和可燃物初始含水率数据。Cell2Fire和FARSITE的模拟时间步长均设定为1 h。

表2 研究区植被类型对应可燃物模型代码和名称
Table 2 Codes and names corresponding to fuel models for vegetation types in the study area

植被类型	FARSITE可燃物模型		Cell2Fire可燃物模型	
	代码	类型	代码	类型
云南松	9	FM9	880	M-4
灌木	20	FM20	32	O-1b
苔原	21	FM21	32	O-1b
草地	31	FM31	32	O-1b
林间草地	31	FM32	32	O-1b
湿地	32	FM32	31	O-1a
白桦林	32	FM33	12	D-2
河漫滩草地	33	FM33	31	O-1a
耕地	92	NB2	105	Non-fuel
冰雪	93	NB3	102	Non-fuel
水体	98	NB8	102	Non-fuel
不透水层	99	NB9	101	Non-fuel

除了必要的输入数据以外，准确的火点数据对于林火蔓延模拟结果同样存在重要影响，本文使用可见光红外成像辐射仪（VIIRS）火点数据初始化和重初始化林火蔓延模拟器。VIIRS的空间分辨率为375 m，每12 h或更短时间内可以实现全球覆盖监测（Justice等，2013），其空间和时间分辨率优于MODIS等其他活火产品。获取的那吉林场和凉山森林火灾期间VIIRS火点数据如图3和图4所示，凉山森林火灾整体和那吉林场森林火灾前期蔓延情况均为自西向东，可能与火场西北和西南

方向存在大面积耕地和居民区有关，林火人为监测和扑灭更及时，而东北和东南方向为大范围林区和草地，更利于火势蔓延。凉山火场北方在5月8日存在火点，但从实际过火范围看火场南北方向几乎不发生火灾蔓延。那吉林场火点数量更多，火势更猛，在火场东北和东南方向自5月18日起有明显的火势蔓延。

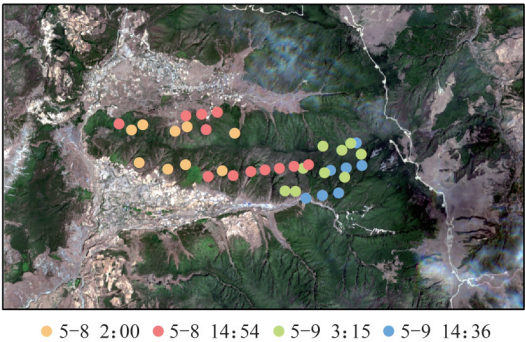


图3 凉山火点分布,底图为2020-04-04 Sentinel-2/MSI数据4、3、2波段合成真彩色影像(5月8日至9日各个时间段出现的火点用不同颜色的圆点标出)

Fig. 3 The distribution of hotspots in Liangshan (The base map is Sentinel-2/MSI true color image synthesized from bands 4, 3 and 2 on April 4, 2020, and the hotspots appearing from May 8 to 9 are marked with colored circles)

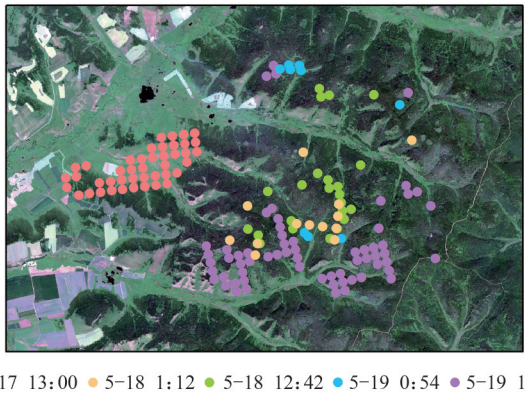


图4 那吉林场火点分布,底图为2016-07-19 Sentinel-2/MSI数据4、3、2波段合成真彩色影像(5月17日至19日各个时间段出现的火点用不同颜色的圆点标出)

Fig. 4 The distribution of hotspots in Naji (The base map is Sentinel-2/MSI true color image synthesized from bands 4, 3 and 2 on July 19, 2016, and the hotspots appearing from May 17 to 19 are marked with colored circles)

2.3 基于BAI阈值提取过火区方法

为了更好地利用研究区火灾期间过火区信息，需要获取不同卫星传感器影像数据，本文采用的遥感监测影像信息如表3所示。

表3 研究区遥感监测影像基本信息

Table 3 Basic information of remote sensing monitoring images in the study area

研究区	传感器	日期	空间分辨率/m
凉山	Landsat 7/ETM+	2020-05-08	30
	Sentinel-2/MSI	2020-05-09	10
	GF-6/WFV	2020-05-10	16
那吉林场	Sentinel-2/MSI	2017-05-18	10
	GF-4/PMS	2017-05-19	50
	GF-1/WFV	2017-05-20	16

BAI指数能更好地突出实际过火区内的木炭信息, 有利于阈值计算从而提取过火区, 其计算公式为

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - \rho_R)^2 + (0.06 - \rho_{NIR})^2} \quad (1)$$

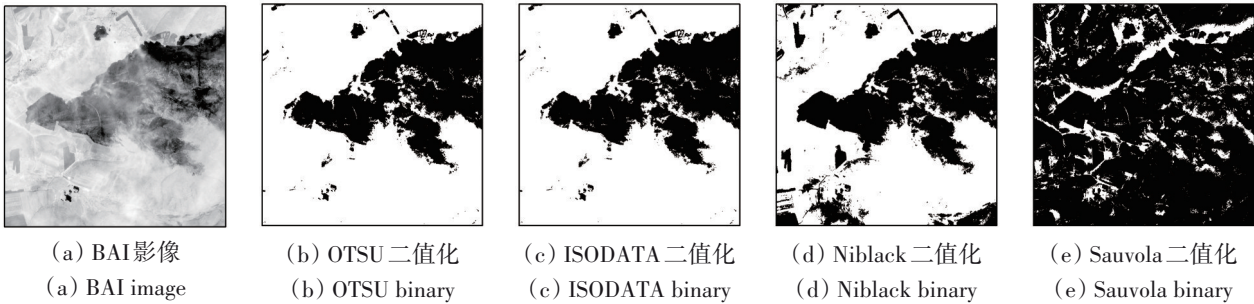


图5 简单阈值计算方法二值化效果

Fig. 5 The binary results by simple threshold method

由于直接使用阈值提取过火区会额外得到实际过火区以外的小图斑, 需要利用区域生长方法提取火点像素连通的区域, 从而剔除错误的过火区, 得到理想的过火区结果。使用每个遥感监测数据时间前所有可获取的VIIRS火点数据作为生长种子, 并根据Niblack阈值定义种子生长规则, 当BAI值大于阈值时将像素加入生长区域, 直至找不到新的像素加入生长区域时生长停止, 最终生长区域即为提取的实际过火区, 如图6所示。

2.4 模拟器重初始化方法

林火蔓延模拟器输入数据自身不准确或模拟器自身的限制会造成模拟火灾蔓延结果边界与真实火灾蔓延结果存在误差 (Benali 等, 2017)。本文使用了3种模拟方法对研究区林火蔓延进行模拟:

(1) 连续模拟: 使用火灾期间最早的VIIRS火

式中, ρ_R 为遥感影像中红光波段反射率, ρ_{NIR} 为近红外波段反射率。

考虑到实际应用中林火蔓延模拟的需求, 选择计算简便的阈值方法提取过火区将更适用于重初始化模拟。选择全局阈值法OTSU和ISODATA, 以及局部阈值法Niblack和Sauvola在那吉林场研究区计算阈值, 结果如图5所示。分析计算结果可知, OTSU和ISODATA方法对BAI直方图计算的阈值结果非常相似, 但在对比度不明显或者被云、烟遮挡的过火区提取效果较差; 相比于Niblack, Sauvola方法进一步考虑了局部灰度值范围内对标准差的影响, 但在前景和背景对比度较小的情况阈值计算结果反而不如Niblack。综上, 本研究选择Niblack方法计算阈值, 并结合火点和区域生长方法剔除非过火区, 提取实际过火区。

点数据初始化并连续模拟多天火灾。

(2) VIIRS重初始化: 使用火灾期间获取的VIIRS初始化和重初始化模拟器, 将前一个时间VIIRS模拟结果设为不可燃区域, 使用当前时间VIIRS重初始化模拟器。

(3) 过火区重初始化模拟: 使用火灾期间获取的VIIRS, 和遥感监测数据阈值提取的过火区初始化和重初始化模拟器。如果当前模拟时间没有可用的遥感监测数据, 则与“VIIRS重初始化”方法一样仅使用VIIRS重初始化模拟器; 如果当前模拟时间获取了遥感监测数据, 将阈值提取的过火区设为不可燃区域 (同时忽略之前VIIRS的模拟结果), 使用接下来的VIIRS重初始化模拟器。后续将VIIRS模拟结果与过火区一并设为不可燃区域, 直至获取到更新的遥感监测数据。火灾期间获取的研究区VIIRS数据和遥感监测数据时间如图7和图8所示, 所有数据时间均已被简略为整时。

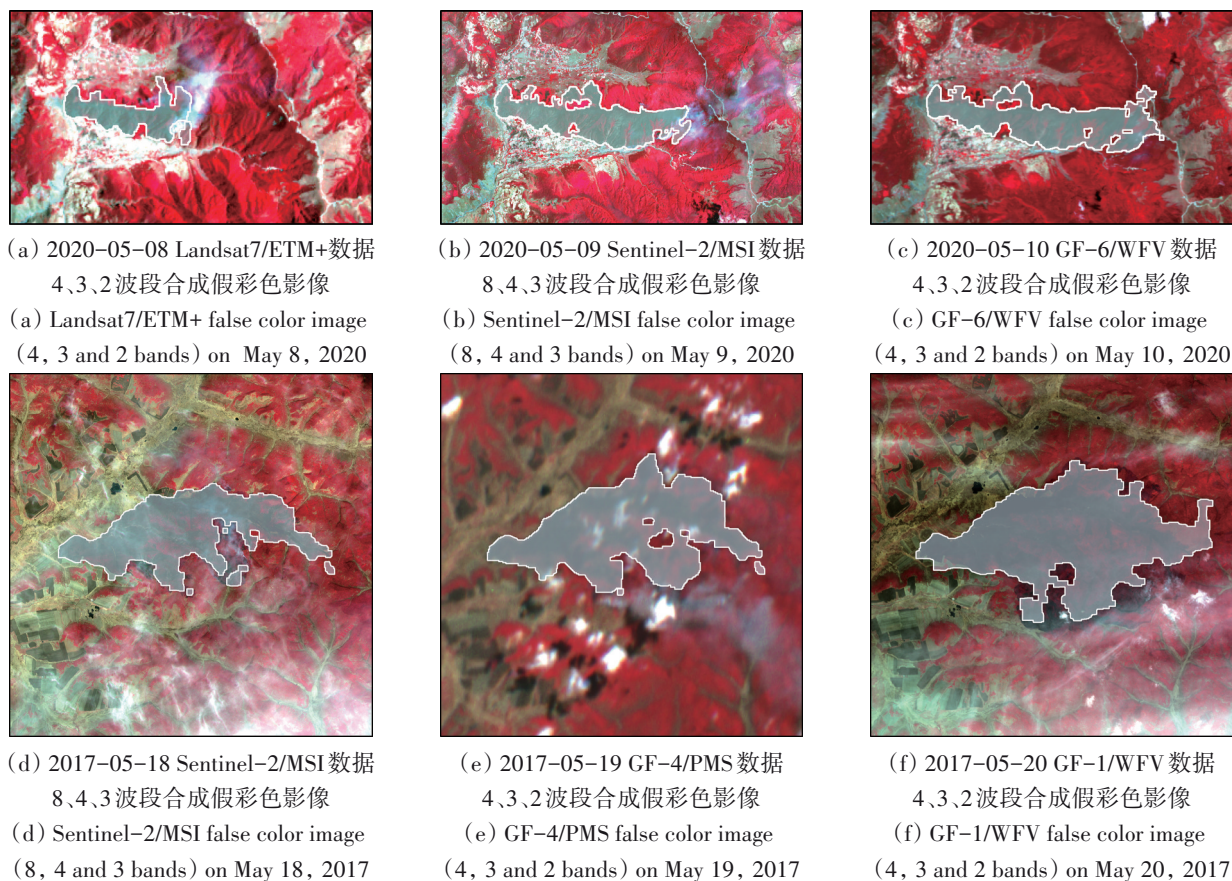


图6 过火区提取结果(提取结果用白色边突出显示)

Fig. 6 Results of the burned area extraction (With the extraction results highlighted by a white border)

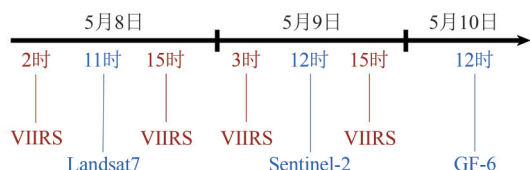


图7 凉山 VIIRS 数据和遥感监测数据整时时间

Fig. 7 The integral timing of VIIRS and remote sensing monitoring data in Liangshan study area

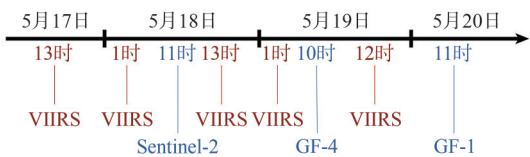


图8 那吉林场 VIIRS 数据和遥感监测数据整时时间

Fig. 8 The integral timing of VIIRS and remote sensing monitoring data in Naji study area

2.5 模拟结果验证方法

将 Cell2Fire 和 FARSITE 模拟输出的过火区与人工目视解译的实际过火区对比, 并将二者对比结果划分为模拟正确、模拟错误和未模拟区域3类, 根据3类区域面积计算 SC (Sørensen's coefficient) (Legendre 和 Legendre, 1998) 作为模拟结果精度

评价(赵璠等, 2017)。SC系数的取值范围为0—1, 相关性越高时越接近1, 说明模拟结果与实际情况越相符(徐奔奔等, 2022)。SC系数的计算公式如下:

$$SC = \frac{2A}{2A + B + C} \quad (2)$$

式中, A 为模拟正确区域面积, B 为模拟错误区域面积, C 为未模拟区域面积。

此外, 以实际过火区、实际非过火区、模拟过火区和模拟非过火区像素构建 2×2 混淆矩阵, 计算精确率 (Precision)、召回率 (Recall) 和 F1 (F1-Score) 3个精度指标:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

$$F1 = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (5)$$

式中, TP 为模拟正确的像素, FP 为过模拟的像素, FN 为未模拟的像素。精确率表明模拟结果中模拟正确的概率, 召回率表明实际过火区中被正确模拟概率, $F1$ 表明精确率和召回率的调和平均值。

3 模拟结果与分析

3.1 凉山森林火灾模拟结果

对于凉山森林火灾模拟，图 9 和图 10 分别列出了基于 Cell2Fire 和 FARSITE 使用不同模拟方法的模拟结果，图 11 为对应模拟结果的 SC 值，表 4 为对应模拟结果的召回率、精确度和 F1 值。

从不同模拟器来看，Cell2Fire 的火灾蔓延速度比 FARSITE 更快，在相同的模拟时间内模拟范围

更大，导致出现更多过模拟区，尤其在过火区重初始化模拟至火灾中期时（Cell2Fire 模拟精度 $SC=0.71$ ， $F1=0.72$ ，而 FARSITE 模拟精度 $SC=0.81$ ， $F1=0.81$ ），在凉山森林火灾模拟中精度差距最大；FARSITE 虽然在 VIIRS 重初始化方法中有较多的未模拟区域，但由于模拟结果的蔓延速度适中，在 3 种模拟方法中模拟精度均高于同方法的 Cell2Fire，最高模拟精度出现在火灾后期的过火区重初始化模拟（ $SC=0.90$ ， $F1=0.89$ ）。

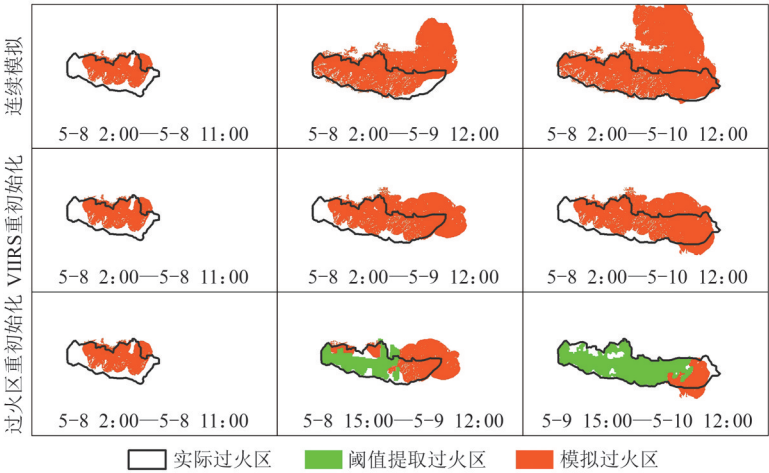


图 9 Cell2Fire 凉山模拟过程
Fig. 9 Simulation process of Liangshan study area by Cell2Fire

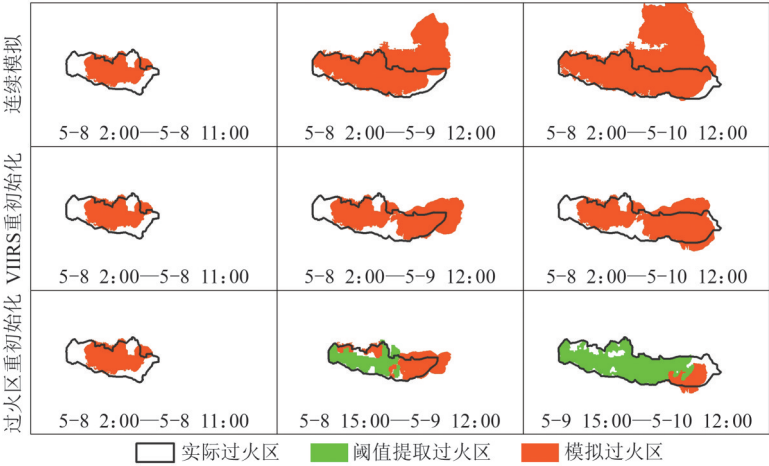


图 10 FARSITE 凉山模拟过程
Fig. 10 Simulation process of Liangshan study area by FARSITE

从不同模拟方法来看，VIIRS 重初始化模拟在火场左侧有更多未模拟区，原因可能为火灾前期火场西部火点较少，然而这种未模拟情况在 VIIRS 重初始化方法中无法通过后续模拟得到修正，导致模拟至火灾中期两种模拟器均出现了模拟精度低于前期和后期的情况；但连续模拟和过火区重初始化方

法则较少受到火点欠缺的影响。连续模拟方法容易出现大范围过模拟的情况，尤其在火灾模拟中期和后期，最低的模拟精度出现在 Cell2Fire 连续模拟至火灾后期（ $SC=0.61$ ， $F1=0.63$ ）；相比之下，VIIRS 重初始化和过火区重初始化方法及时限制了火灾在东北方向的蔓延势头，因此只有小部分过模拟区。

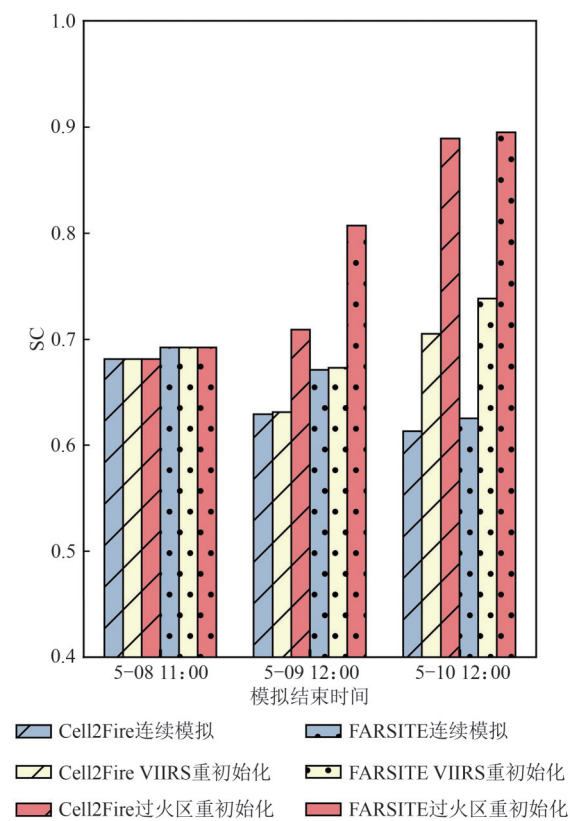


图 11 凉山模拟结果 SC 值

Fig. 11 The SC value of simulation results in Liangshan study area

表 4 凉山火灾模拟结果混淆矩阵指标比较

Table 4 Comparison of confusion matrix metrics of Liangshan fire simulation results

模拟器模拟方法	模拟时间	召回率	精确度	F1
Cell2Fire 连续模拟	5-8 2:00—5-8 11:00	0.6	0.82	0.7
	5-8 2:00—5-9 12:00	0.88	0.51	0.65
	5-8 2:00—5-10 12:00	0.96	0.46	0.63
Cell2Fire VIIRS 重初始化	5-8 2:00—5-8 11:00	0.6	0.82	0.7
	5-8 2:00—5-9 12:00	0.77	0.55	0.64
	5-8 2:00—5-10 12:00	0.81	0.65	0.72
Cell2Fire 过火区 重初始化	5-8 2:00—5-8 11:00	0.6	0.82	0.7
	5-8 15:00—5-9 12:00	0.87	0.61	0.72
	5-9 15:00—5-10 12:00	0.86	0.93	0.89
FARSITE 连续模拟	5-8 2:00—5-8 11:00	0.58	0.87	0.7
	5-8 2:00—5-9 12:00	0.89	0.55	0.68
	5-8 2:00—5-10 12:00	0.92	0.48	0.63
FARSITE VIIRS 重初始化	5-8 2:00—5-8 11:00	0.58	0.87	0.7
	5-8 2:00—5-9 12:00	0.7	0.66	0.68
	5-8 2:00—5-10 12:00	0.74	0.74	0.74
FARSITE 过火区 重初始化	5-8 2:00—5-8 11:00	0.58	0.87	0.7
	5-8 15:00—5-9 12:00	0.9	0.74	0.81
	5-9 15:00—5-10 12:00	0.82	0.96	0.89

注:加粗字体为最高和最低的F1值。

3.2 那吉林场森林火灾模拟结果

对于那吉林场森林火灾模拟,图12和图13分别列出了基于Cell2Fire和FARSITE使用不同模拟方法的模拟结果,图14为对应模拟结果的SC值,表5为对应模拟结果的召回率、精确度和F1值。

从不同模拟器来看,Cell2Fire和FARSITE模拟结果并不表现出明显的优劣,虽然FARSITE的VIIRS重初始化和过火区重初始化模拟精度高于Cell2Fire,但FARSITE连续模拟至中、后期,精度明显低于前期(模拟至18日11时SC=0.69,19日10时SC=0.54,20日11时SC=0.54),Cell2Fire连续模拟结果精度则保持稳定(18日11时SC=0.63,19日10时SC=0.62,20日11时SC=0.62)。与凉山林火蔓延模拟情况相反的是,FARSITE整体蔓延速度比Cell2Fire快,尤其是FARSITE连续模拟至火灾后期,模拟结果大范围超出实际过火区甚至超出视野区。

从不同模拟方法来看,在凉山林火蔓延模拟中出现的连续模拟存在大范围过模拟区,以及VIIRS重初始化模拟存在较多未模拟区的问题,在那吉林场中同样存在。由于那吉林场过火面积更大,重初始化方法和连续模拟结果精度的差别明显增大,其中差别最大的为FARSITE模拟至19日10时的过火区重初始化(SC=0.88,F1=0.88)和连续模拟(SC=0.54,F1=0.55)。

对比不同模拟器可知,FARSITE和Cell2Fire模拟结果比较相似,但在多数情况下FARSITE模拟精度高于Cell2Fire。猜测其原因为:(1)FARSITE和Cell2Fire使用了部分相同的数学建模方法,例如均使用了惠更斯波传播模型和Richards偏微分方程模拟跨异质景观的火灾蔓延速率和火灾生长(Pais等,2021),因此两种模拟器在相同研究区都获得了较为相似的模拟结果。(2)FARSITE和Cell2Fire在长时间连续模拟时都出现了大范围过模拟的情况,而模拟器自身理论模型对火焰传播速度的高估、输入数据的不准确以及实际火灾中的灭火扑救行动等因素都会导致该现象的出现(Jahdi等,2016)。(3)FARSITE的可燃物模型可以根据当地可燃物特征参数进行自定义修改(如表3所示的灌木等植被类型对应的可燃物模型),可适当将模型内置可燃物进行本地化(赵璠等,2017),有利于FARSITE提高模拟结果精度,但Cell2Fire目前只能使用FBP标准可燃物模型而无法自定义或修改可燃物模型,

可能导致其模拟精度略低于FARSITE。目前中国尚未有本土化的林火蔓延模拟器和系统的本土化可燃物模型，因此在实际林火蔓延模拟工作中，需要优

先考虑选择可自定义可燃物模型的林火蔓延模拟器，并结合当地可燃物特征参数构建更贴合实际的可燃物模型，可以进一步提高林火蔓延模拟精度。

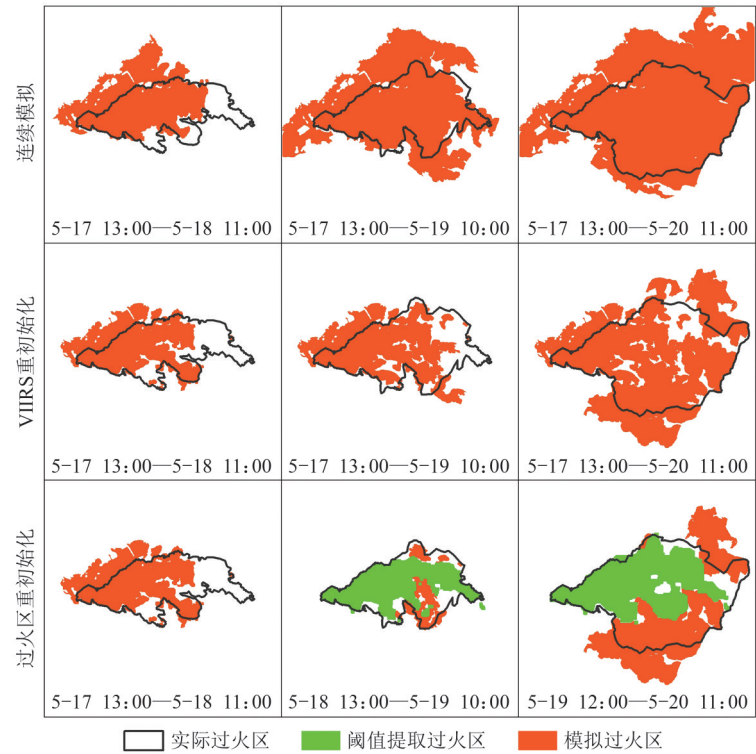


图 12 Cell2Fire那吉林场模拟过程
Fig. 12 Simulation process of Naji study area by Cell2Fire

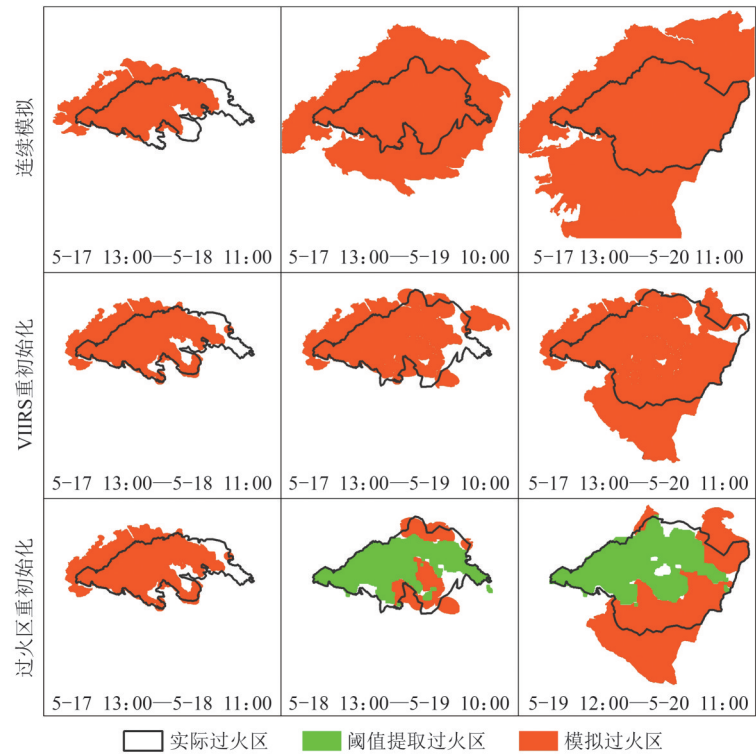


图 13 FARSITE那吉林场模拟过程
Fig. 13 Simulation process of Naji study area by FARSITE

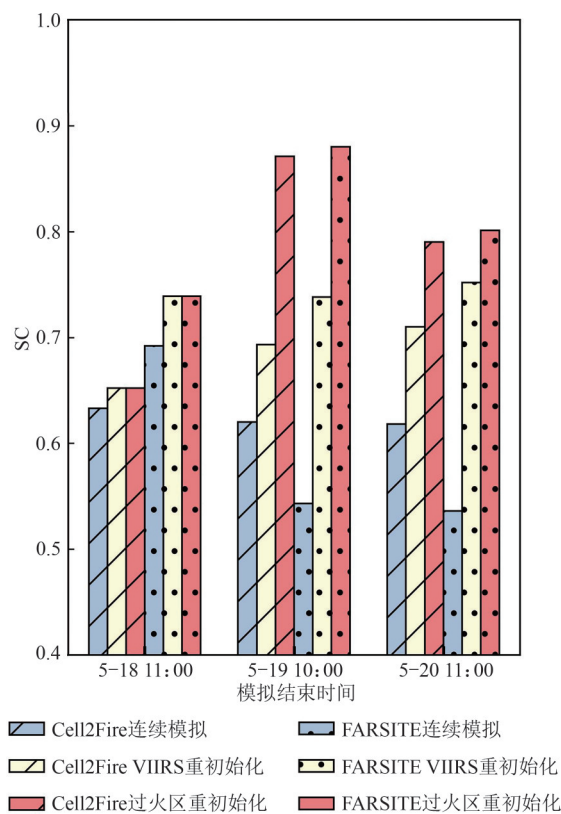


图 14 那吉林场模拟结果SC值
Fig. 14 The SC value of simulation results in Naji study area

表 5 那吉林火灾模拟结果混淆矩阵指标比较
Table 5 Comparison of confusion matrix metrics of Naji fire simulation results

模拟器模拟方法	模拟时间	召回率	精确度	F1
Cell2Fire 连续模拟	5-17 13:00-5-18 11:00	0.7	0.68	0.69
	5-17 13:00-5-19 10:00	0.95	0.48	0.64
	5-17 13:00-5-20 11:00	0.99	0.462	0.63
Cell2Fire VIIRS 重初始化	5-17 13:00-5-18 11:00	0.64	0.67	0.65
	5-17 13:00-5-19 10:00	0.68	0.71	0.69
	5-17 13:00-5-20 11:00	0.83	0.62	0.71
Cell2Fire 过火区 重初始化	5-17 13:00-5-18 11:00	0.64	0.67	0.65
	5-18 13:00-5-19 10:00	0.81	0.94	0.87
	5-19 12:00-5-20 11:00	0.89	0.71	0.79
FARSITE 连续模拟	5-17 13:00-5-18 11:00	0.76	0.64	0.69
	5-17 13:00-5-19 10:00	1	0.38	0.55
	5-17 13:00-5-20 11:00	1	0.37	0.54
FARSITE VIIRS 重初始化	5-17 13:00-5-18 11:00	0.8	0.69	0.74
	5-17 13:00-5-19 10:00	0.85	0.66	0.74
	5-17 13:00-5-20 11:00	0.93	0.63	0.75
FARSITE 过火区 重初始化	5-17 13:00-5-18 11:00	0.8	0.69	0.74
	5-18 13:00-5-19 10:00	0.88	0.88	0.88
	5-19 12:00-5-20 11:00	0.95	0.7	0.8

注:粗体为最高和最低的F1值。

对比不同模拟方法可知,3种方法模拟结果精度大致可以总结为:过火区重初始化>VIIRS重初始化>连续模拟。模拟结果SC值与混淆矩阵指标整体趋势基本一致,精度较高的结果主要来自火灾模拟至中后期的过火区重初始化方法(如FARSITE对凉山火灾模拟至10日12时SC=0.90、F1=0.89;Cell2Fire对那吉林场火灾模拟至19日10时SC=0.87、F1=0.87),而精度较低的结果则主要来自中后期的连续模拟方法(如Cell2Fire对凉山火灾模拟至10日12时SC=0.613、F1=0.63;FARSITE对那吉林场火灾模拟至20日11时SC=0.54、F1=0.54)。连续模拟往往会出现大范围过模拟区,并且模拟的误差会在长时间模拟过程中持续传播;VIIRS重初始化模拟结果精度更依赖VIIRS火点数据的时间和空间分辨率,在火灾前期火势较小时不利于检测出热异常点从而无法获取到火灾更早期的火点,容易导致模拟结果中有较多未模拟区;过火区重初始化模拟方法在3种方法中模拟效果最好,基于BAI的Niblack阈值提取过火区适合对大部分遥感光学影像自动提取过火区,以较低的时间成本和人工成本同时结合由遥感手段获取到的火点和过火区数据,从而能近实时地调整长时间模拟中火灾蔓延态势,有效减少了连续模拟和VIIRS重初始化模拟导致的结果误差。此外,影响林火蔓延模拟结果除了受输入数据准确性和模拟模型或模拟器自身限制的影响,还受实际森林火灾中灭火扑救工作的影响,因此过火区重初始化提供了一种更灵活、更贴合实际需求的林火蔓延模拟方式。随着遥感技术的发展,未来的过火区重初始化方法可以基于更多的技术手段获取更高时间和空间分辨率的火点和过火区数据,并应用于更多不同的林火蔓延模拟器或林火蔓延模拟模型。

4 结 论

本文使用Cell2Fire和FARSITE模拟了四川省凉山和内蒙古自治区那吉林场森林火灾,两场火灾具有不同的火灾规模和火场条件,可以更好地对比评估Cell2Fire和FARSITE对于中国森林火灾的模拟效果。同时,提出一种基于BAI指数与区域生长自动提取过火区并重初始化模拟的方法,该方法可提高不同模拟器的模拟精度。计算SC值、召回率、精确度和F1几种指标,对比Cell2Fire和FARSITE分别使用连续模拟、VIIRS重初始化模拟

和过火区重初始化模拟的模拟结果精度。本文结论如下:

(1) FARSITE 和 Cell2Fire 模拟结果差别较小,多数情况下 FARSITE 模拟精度高于 Cell2Fire。

(2) 基于 BAI 指数和区域生长方法可以自动提取过火区,该方法简单且提取结果可靠,节约时间和人工成本的同时更适合实际林火蔓延模拟工作需求。

(3) 过火区重初始化方法将自动提取的过火区与 VIIRS 火点数据结合用于林火蔓延模拟,能有效改善火灾早期缺少火点而导致模拟不充分的问题,以及长时间模拟导致的误差累积问题。过火区重初始化方法的模拟结果在 Cell2Fire 和 FARSITE 的模拟结果中精度最高,表明对于提高模拟结果准确性来说,选择合适的模拟方法可能比选择林火蔓延模拟器更重要。

未来的研究工作仍需对更多具有不同地形、气象,以及可燃物等条件下的林区进行林火蔓延模拟,进一步验证 FARSITE 和 Cell2Fire 的普适性和可靠性。此外,需要更深入探讨不同林火蔓延模拟器的模型机理差异,尤其是模拟器中内置的可燃物模型相关参数对模拟结果的影响,从而使模拟器的设置更适用于中国复杂多变的森林火灾情况。

参考文献(References)

- Albini F A. 1985. A model for fire spread in wildland fuels by-radiation. *Combustion Science and Technology*, 42(5/6): 229-258 [DOI: 10.1080/00102208508960381]
- Bataineh B, Abdullah S N H S and Omar K. 2011. An adaptive local binarization method for document images based on a novel thresholding method and dynamic windows. *Pattern Recognition Letters*, 32(14): 1805-1813 [DOI: 10.1016/j.patrec.2011.08.001]
- Benali A, Sá A C L, Ervilha A R, Trigo R M, Fernandes P M and Pereira J M C. 2017. Fire spread predictions: sweeping uncertainty under the rug. *Science of The Total Environment*, 592: 187-196 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.106]
- Bezdek J C. 1980. A convergence theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-2(1): 1-8 [DOI: 10.1109/tpami.1980.4766964]
- Cardil A, Monedero S, Ramírez J and Silva C A. 2019. Assessing and reinitializing wildland fire simulations through satellite active fire data. *Journal of Environmental Management*, 231: 996-1003 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.115]
- Carrasco J, Pais C, Shen Z J M and Weintraub A. 2019. Adjusting rate of spread factors through derivative-free optimization: a new methodology to improve the performance of forest fire simulators. *arXiv preprint arXiv:1909.05949*
- Cheney N P, Gould J S and Catchpole W R. 1998. Prediction of fire spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire*, 8(1): 1-13 [DOI: 10.1071/WF9980001]
- Fons W L. 1946. Analysis of fire spread in light forest fuels. *Journal of Agricultural Research*, 72(3): 92-121
- Ghali R and Akhloufi M A. 2023. Deep learning approaches for wildland fires using satellite remote sensing data: detection, mapping, and prediction. *Fire*, 6(5): 192 [DOI: 10.3390/fire6050192]
- Hawbaker T J, Vanderhoof M K, Beal Y J, Takacs J D, Schmidt G L, Falgout J T, Williams B, Fairaux N M, Caldwell M K, Picotte J J, Howard S M, Stitt S and Dwyer J L. 2017. Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 198: 504-522 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.027]
- Jahdi R, Salis M, Darvishsefat A A, Alcasena F, Mostafavi M A, Etemad V, Lozano O M and Spano D. 2016. Evaluating fire modeling systems in recent wildfires of the Golestan National Park, Iran. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 89(2): 136-149 [DOI: 10.1093/forestry/cpv045]
- Justice C O, Román M O, Csiszar I, Vermote E F, Wolfe R E, Hook S J, Friedl M, Wang Z S, Schaaf C B, Miura T, Tschudi M, Riggs G, Hall D K, Lyapustin A I, Devadiga S, Davidson C and Masuoka E J. 2013. Land and cryosphere products from Suomi NPP VIIRS: overview and status. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(17): 9753-9765 [DOI: 10.1002/jgrd.50771]
- Kudláčková L, Poděbradská M, Bláhová M, Cienciala E, Beranová J, McHugh C, Finney M, Novotný J, Zahradníček P, Štěpánek P, Linda R, Píkl M, Věbová D, Možný M, Surový P, Žalud Z and Trnka M. 2024. Using FlamMap to assess wildfire behavior in Bohemian Switzerland National Park. *Natural Hazards*, 120(4): 3943-3977 [DOI: 10.1007/s11069-023-06361-8]
- Laneve G, Di Fonzo M, Pampanoni V and Morles R B. 2024. Progress and limitations in the satellite-based estimate of burnt areas. *Remote Sensing*, 16(1): 42 [DOI: 10.3390/rs16010042]
- Lasaponara R and Tucci B. 2019. Identification of burned areas and severity using SAR Sentinel-1. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(6): 917-921 [DOI: 10.1109/lgrs.2018.2888641]
- Legendre P and Legendre L. 1998. *Numerical Ecology*. Amsterdam: Elsevier Science and Technology
- Liu J X, Maeda E E, Wang D and Heiskanen J. 2021. Sensitivity of spectral indices on burned area detection using Landsat time series in savannas of southern Burkina Faso. *Remote Sensing*, 13(13): 2492 [DOI: 10.3390/rs13132492]
- Mitchell H, Gwynne S, Ronchi E, Kalogeropoulos N and Rein G. 2023. Integrating wildfire spread and evacuation times to design safe triggers: application to two rural communities using PERIL model. *Safety Science*, 157: 105914 [DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105914]
- Mpakairi K S, Kadzunge S L and Ndaimani H. 2020. Testing the utility of the blue spectral region in burned area mapping: insights from savanna wildfires. *Remote Sensing Applications: Society and*

- Environment, 20: 100365 [DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100365]
- Niblack W. 1985. An introduction to digital image processing. Topstryket: Strandberg Publishing Company
- Otsu N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9(1): 62-66 [DOI: 10.1109/tsmc.1979.4310076]
- Pais C, Carrasco J, Martell D L, Weintraub A and Woodruff D L. 2021. Cell2Fire: a cell-based forest fire growth model to support strategic landscape management planning. Frontiers in Forests and Global Change, 4: 692706 [DOI: 10.3389/ffgc.2021.692706]
- Papadopoulos G D and Pavlidou F N. 2011. A comparative review on wildfire simulators. IEEE Systems Journal, 5(2): 233-243 [DOI: 10.1109/jsyst.2011.2125230]
- Rao Y M, Wang C and Huang H G. 2020. Forest fire monitoring based on multisensor remote sensing techniques in Muli County, Sichuan Province. National Remote Sensing Bulletin, 24(5): 559-570 (饶月明, 王川, 黄华国. 2020. 联合多源遥感数据监测四川木里县森林火灾. 遥感学报, 24(5): 559-570) [DOI: 10.11834/jrs.20209125]
- Rothermel R C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper INT-115. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station: 40
- Sá A C L, Benali A, Fernandes P M, Pinto R M S, Trigo R M, Salis M, Russo A, Jerez S, Soares P M M, Schroeder W and Pereira J M C. 2017. Evaluating fire growth simulations using satellite active fire data. Remote Sensing of Environment, 190: 302-317 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.023]
- Sali M, Piaser E, Boschetti M, Brivio P A, Sona G, Bordogna G and Stroppiana D. 2021. A burned area mapping algorithm for Sentinel-2 data based on approximate reasoning and region growing. Remote Sensing, 13(11): 2214 [DOI: 10.3390/rs13112214]
- Sauvola J and Pietikäinen M. 2000. Adaptive document image binarization. Pattern Recognition, 33(2): 225-236 [DOI: 10.1016/s0031-3203(99)00055-2]
- Stocks B J, Lawson B D, Alexander M E, van Wagner C E, McAlpine R S, Lynham T J and Dubé D E. 1989. Canadian forest fire danger rating system: an overview. The Forestry Chronicle, 65(4): 258-265 [DOI: 10.5558/tfc65258-4]
- Sullivan A L. 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 2: empirical and quasi-empirical models. International Journal of Wildland Fire, 18(4): 369-386 [DOI: 10.1071/wf06142]
- Sun L Y, Xu C C, He Y L X, Zhao Y J, Xu Y, Rui X P and Xu H W. 2021. Adaptive forest fire spread simulation algorithm based on cellular automata. Forests, 12(11): 1431 [DOI: 10.3390/f12111431]
- Tang L Y, Mao H H, Chen C C and Huang H Y. 2015. Three-dimensional visual simulation of forest fire spread based on FARSITE. Journal of Natural Disasters, 24(2): 221-227 (唐丽玉, 毛行辉, 陈崇成, 黄洪宇. 2015. 基于FARSITE的林火蔓延三维可视化模拟. 自然灾害学报, 24(2): 221-227) [DOI: 10.13577/j.jnd.2015.0228]
- Wu Z W, He H S, Liang Y, Luo X and Cai L Y. 2012. Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE model. Acta Ecologica Sinica, 32(19): 6176-6186 (吴志伟, 贺红士, 梁宇, 罗旭, 蔡龙炎. 2012. 基于FARSITE模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征. 生态学报, 32(19): 6176-6186) [DOI: 10.5846/stxb201109111333]
- Xu B B, Wang W Y, Chen L F, Tao J H, Ji X Y, Zhang C J and Fan M. 2022. Forest fire spread simulation based on VIIRS active fire data and FARSITE model. National Remote Sensing Bulletin, 26(8): 1575-1588 (徐奔奔, 王炜烨, 陈良富, 陶金花, 纪轩禹, 张成杰, 范萌. 2022. 基于VIIRS火点数据和FARSITE系统的森林火灾蔓延模拟. 遥感学报, 26(8): 1575-1588) [DOI: 10.11834/jrs.20219427]
- Yoo S and Song J. 2023. Rapid prediction of wildfire spread using ensemble Kalman filter and polyline simplification. Environmental Modelling and Software, 160: 105610 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105610]
- Yuan Y, Lin L, Huo L Z, Kong Y L, Zhou Z G, Wu B and Jia Y. 2020. Using an attention-based LSTM encoder-decoder network for near real-time disturbance detection. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13: 1819-1832 [DOI: 10.1109/jstars.2020.2988324]
- Zhao F, Shu L F, Zhou R L, Xiao X M, Wang M Y, Zhao F J and Wang Q H. 2017. Evaluating fire behavior simulators in southwestern China forest area. Chinese Journal of Applied Ecology, 28(10): 3144-3154 (赵璠, 舒立福, 周汝良, 肖向明, 王明玉, 赵凤君, 王秋华. 2017. 西南林区森林火灾火行为模拟模型评价. 应用生态学报, 28(10): 3144-3154) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.201710.012]

Comparative analysis of forest fire spread simulation and reinitialization methods based on FARSITE and Cell2Fire

XIN Qi¹, YUAN Yuan², ZHOU Junhan¹, LI Ziyang³, ZHOU Zengguang³

1. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210000, China;

2. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210000, China;

3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The utilization of remote sensing data for forest fire spread simulation is predicated on the acquisition of critical information such as combustibles, topography, and ignition points through remote sensing technology. These data, when integrated with forest fire spread

models, are pivotal for predicting the trajectory of forest fires and serve as a vital reference for forest fire prevention and emergency response operations. This study harnesses two fire spread simulation tools, Cell2Fire and FARSITE, to simulate two forest fire events occurring in the Liangshan of Sichuan and the Naji Forestry Site in Inner Mongolia, comparing the precision of these simulators.

Addressing the challenge of suboptimal accuracy in continuous simulations, the study proposes an innovative reinitialization method for burned areas. This method is based on the Burned Area Index (BAI) spectral index combined with region-growing approach. The study compares the simulation precision of FARSITE and Cell2Fire across three methodologies: continuous simulation, VIIRS reinitialization, and the proposed burned area reinitialization.

In the Liangshan fire simulations, Cell2Fire projected a faster spread of fire compared with FARSITE, although FARSITE consistently outperformed Cell2Fire in simulation accuracy across all methods. In the simulations for the Naji Forestry Site, FARSITE's VIIRS reinitialization and burned area reinitialization methods yielded higher precision than Cell2Fire, but its continuous simulation accuracy considerably diminished and underperformed relative to Cell2Fire. When comparing the accuracy of the three simulation methods, the SC values and confusion matrix indicators showed a general agreement, with the higher precision outcomes predominantly emerging from the burned area reinitialization method applied during the mid to later stages of the fires, with most SC values and F1 scores exceeding 0.8.

The conclusions of this study are as follows (1) The simulation outcomes from FARSITE and Cell2Fire show minor discrepancies, with FARSITE demonstrating superior accuracy in most scenarios compared with Cell2Fire. (2) Utilizing the BAI and regional growth methodologies enables the automatic extraction of burned areas. This approach is not only simple and reliable in extracting results but also saves time and labor costs, making it more suitable for practical applications in forest fire spread simulations. (3) The reinitialization method for burned areas, which integrates automatically extracted burned areas with VIIRS fire spot data for forest fire spread simulations, remarkably enhances the mitigation of issues related to insufficient fire spots in the early stages of a fire and the accumulation of errors during prolonged simulations. The simulation outcomes utilizing this method exhibit the highest accuracy within the simulations conducted by Cell2Fire and FARSITE, suggesting that the selection of an appropriate simulation approach may be more crucial to improving the accuracy of simulation results than the choice of a forest fire spread simulator.

Key words: FARSITE, Cell2Fire, VIIRS, forest fire, fire spread simulation, “5·7” Liangshan fire, “5·17” Naji fire

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC3000302); National Natural Science Foundation of China (No. 41901356); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No. KYCX23_1069)