

武晋雯, 孙龙或, 纪瑞鹏, 等. 火烧迹地信息遥感提取研究进展与展望[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 151–156. [WU Jinwen, SUN Longyu, JI Ruipeng, et al. Research Progress and Prospect of Remote Sensing on Extracting Burned Areas Information [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 151–156. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.028.]

火烧迹地信息遥感提取研究进展与展望^{*}

武晋雯^{1,2}, 孙龙或³, 纪瑞鹏^{1,2}, 冯 锐^{1,2}, 于文颖^{1,2}, 张玉书^{1,2}

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 2. 辽宁省农业气象灾害重点实验室, 辽宁 沈阳 110166;
3. 沈阳市气象局 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 火烧迹地是描述森林燃烧最重要的信息之一, 也是碳循环扰动和全球变化研究的重要参数。重点对近年来国内外广泛使用的火烧迹地产品的解译标志和模型算法进行了归纳总结, 以往研究主要侧重于火烧迹地提取模型算法开发, 忽视了复杂地形下阴影、纹理等细节特征的作用, 限制了人们对火烧迹地的准确提取和科学评估。针对该问题提出了对火烧迹地信息提取改进途径的展望, 基于模拟真实地表的 DEM 参数, 优化地形校正效果, 建立阴影校正植被指数; 明确灰度纹理产生的条件, 尝试建立颜色空间和灰度纹理映射方案, 实现颜色纹理的定量解译; 耦合阴影校正植被指数与颜色纹理, 减少对小面积火点的遗漏和混淆信息误判, 基于高分卫星数据实现长时间序列高精度火烧迹地信息提取, 对探讨全球火烧迹地产品研发具有典型代表意义。

关键词: 遥感监测; 火烧迹地; 地形校正; 纹理; 随机森林模型

中图分类号: X43; S762; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0151-06
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.028

据统计中国建国以来共发生森林火灾 70.5 万次, 受灾面积 38.74 万 km², 伤亡 3.3 万人, 直接经济损失达数千亿元^[1]。在生态文明建设的战略部署下, 由于基础设施的完善和管理力度的加强, 森林火灾发生次数有所下降, 但并未得到全面遏制^[2]。随着全球经济快速发展、城市化进程加快、持续暖干化气候以及禁伐产生的可燃物堆积, 导致了森林火灾危害程度不断加大, 例如四川凉山州大火(2020)、美国加州大火(2018)以及澳大利亚山火(2019), 产生的危害和损失不可估量。森林燃烧对环境、经济和社会的影响也进一步凸显, 引起了国家和当地政府的高度重视^[3]。火烧迹地是描述森林燃烧最重要的信息之一, 是经火灾烧毁后尚未长成新林的土地, 它能够提供森林火灾发生时间、频度、位置、面积以及空间分布等重要信息^[4]。它是火灾形成机制不可或缺的研究对象^[5], 是影响森林资源保护、植被恢复、碳排放等至关重要的变量^[6], 也是碳循环扰动和全球变化研究的重要参数^[7]。卫星遥感是区域和全球范围内监测火烧迹地的有效手段, 中国科学院(CAS)、欧盟(EU)、欧洲航天局(ESA)、美国国

家航空航天局(NASA)、美国地质调查局(USGS)等空间机构一直致力于系统地研究全球火烧迹地(burned area, BA)产品, 希望满足国家对生态保护的要求以及碳循环、气候变化等研究需求。因此, 开展长时间序列高精度火烧迹地信息提取尤为重要, 但以往研究主要侧重于模型算法开发, 忽视了复杂地形下阴影、纹理等细节特征的作用, 限制了人们对火烧迹地的准确提取和科学评估。由于遥感时空分辨率的相互制约以及火烧迹地地表复杂性, 实现长时间序列高精度火烧迹地信息提取一直是相关研究领域亟待解决的技术难题。

1 火烧迹地信息遥感提取研究进展

火烧迹地遥感始于 1980 年代^[8], 传统的火烧迹地信息提取主要通过地表反射率和植被指数的变化来实现, 大多采用甚高分辨率辐射计(AVHRR)、中分辨率成像光谱仪(MODIS)以及地球观测系统(SPOT)数据, 空间分辨率 250 m ~ 1 km, 如 GEOLAND2、MCD64 和 Fire_CCI 50 等

^{*} 收稿日期: 2020-04-28 修回日期: 2020-07-01

基金项目: 辽宁省自然基金指导计划项目(2019-ZD-0857); 高分产业化应用项目(70-Y40G09-9001-18/20); 辽宁省气象局重点项目(201603)

第一作者简介: 武晋雯(1980-), 女, 山西陵川人, 硕士, 研究员, 主要从事生态环境领域的遥感应用研究。

E-mail: pipi824@126.com

通讯作者: 张玉书(1963-), 女, 辽宁锦州人, 学士, 正研级高级工程师, 主要从事农业气象和生态环境领域的研究。

E-mail: yushuzhang@126.com

(表 1), 尽管 EU、ESA 和 NASA 所属的几大研究机构逐步侧重于小面积火烧迹地提取算法的研发, 从双向反射模型发展到考虑火灾和植被变化的混合模型, 再到改进的两阶段模型的技术革新, 使得混合模型和两阶段模型在提取 1.2 km^2 、 0.5 km^2 的火烧迹地上具有更大潜力, 但仍存在较大误差。尽管如此, 一直被认为是最精确的 MCD64 产品, 它的错分误差 (CE) 和漏分误差 (OE) 仍高达 42% 和 68%^[9]。现有研究表明, 空间分辨率大于 100 m 的区域产品无法提供足够的空间细节^[10], 为了满足多尺度研究和生态保护要求, 研制了中高分辨率的 BA 产品 (表 1), 采用空间分辨率 30 m 的 Landsat 卫星数据, 如 CAS 全球首发的 GABAM2015、USGS 发布覆盖美国本土的 MTBS 和 BAECV (表 1), 这些产品对火烧迹地空间细节的表现, 有了一定程度提高, 但仍存在较大的漏分误差并无法满足长时间序列的要求。

1.1 反射率变化

燃烧区域的特点是木炭和灰烬的沉积、植被和植被结构发生改变, MCD45、GEOLAND2 产品正是利用这种光谱反射率时间和结构变化, 采用双向反射模型算法^[11]、反射率时间检索算法^[12]实现火烧迹地信息提取。双向反射模型算法 (BRDF) 通过日地表反射率时间序列数据的变化提取燃烧范围和大致日期, MODIS 通道 5 ($1.240 \mu\text{m}$) 的地表反射率对识别燃烧和未燃烧表面最为敏感, 因此 MCD45 产品利用 $1.240 \mu\text{m}$ 反射率识别燃烧和未燃烧表面、结合 $2.130 \mu\text{m}$ 反射率消除与燃烧无关的变化。反射率时间检索算法基于 SPOTVGT 卫星 $0.45 \mu\text{m}$ 、 $1.66 \mu\text{m}$ 以及 $0.45 \mu\text{m}$ 的反射率数据

构建云雪掩模和火焰烟雾掩模, 同时利用 $0.83 \mu\text{m}$ 反射率构建时间指数 (I)、结合 $1.66 \mu\text{m}$ 反射率进行火烧迹地信息提取。

1.2 混合算法

MCD64^[13]、SNP64A1^[14] 产品应用混合算法实现火烧迹地信息提取。首先进行反射率变化时间序列检索, 然后利用 $1.240 \mu\text{m}$ 和 $2.130 \mu\text{m}$ 反射率构建燃烧敏感指数 (VI), 以 VI 突然减少作为识别燃烧和未燃烧表面的重要信号; 然后, 通过两个相邻滑动时间窗内 (前 10 d 和后 10 d) 的平均值和标准差来分析 VI 数据时间序列, 统计燃烧前后 VI 变化; 叠加热异常产品过滤未燃烧像元, 计算各类土地覆盖条件下燃烧和非燃烧表面的概率密度, 进行初始分类; 最后, 根据邻域条件分析细化初始分类结果, 实现火烧迹地信息提取。

1.3 两阶段算法

第一阶段先检测出最明显的燃烧像元 (称为种子像元), 第二阶段围绕种子像元的增长过程进行燃烧形状检测, 该方法在检测面积小于 0.5 km^2 的火烧迹地上具有更大潜力, 如 Fire_CCI 41^[5]、Fire_CCI 50^[6]。该算法没有利用 BRDF 修正, 因为经过测试 BRDF 修正会削弱燃烧信号。第一阶段将种子像元定位在近红外反射率产品中, 种子周围具有最小反射率的像元被选为燃烧像元, 创建未燃烧和潜在燃烧区域的累积分布函数 (CDF); 第二阶段将新燃烧像元添加到第一阶段创建的燃烧像元中, 在每个迭代中候选新燃烧像元与种子像元必须是相邻的, 同时利用全局环境监测指数 (GEMI), 用于火烧迹地信息提取, 迭代过程反复进行直到没有新像元添加。

表 1 火烧迹地遥感研究方法一览表

数据集	模型算法	解译标志	CE/OE	适用性分析
MCD45 (MODIS/500 m)	双向反射模型 ^[11]	MODIS 5、6、2 波段反射率	46/72	以活跃火灾燃烧面积代表火烧迹地, 误差大;
GEOLAND2 (SPOT/1 km)	反射率时间检索 ^[12]	近红外时间检索指数	74/91	
MCD64 (MODIS/500 m)	混合算法 ^[13]	燃烧植被指数 (VI)	42/68	考虑植被变化特征, 具有提取 1.2 km^2 火烧迹地的潜力, 误差大;
SNP64A1 (VIIRS/500 m)	混合算法 ^[14]	地表反射率、VI	/	
Fire_CCI41 (MERIS/500 m)	两阶段算法 ^[5]	近红外反射率	52/51	随燃烧像元增长过程变化, 具有提取 0.5 km^2 火烧迹地的潜力, 误差大;
Fire_CCI50 (MODIS/250 m)	两阶段算法 ^[6]	地表反射率、GEMI	51/71	
GABAM (Landsat/30 m)	随机森林法 ^[15]	地表反射率、归一化燃烧比 NBR、BAI、中红外燃烧指数 (MIRBI)、NDVI、GEMI、土壤调整植被指数、归一化差异湿度指数 (NDMI)	13/30	考虑对燃烧敏感的指数特征, 增强了空间细节, 但漏分误差较大;
MTBS (Landsat/30 m)	半自动机器学习 ^[16]	rdNBR、NBR、MIRBI、烧焦土壤指数	15.5/	
BAECV (Landsat/30 m)	回归树 ^[17]	NBR、MIRBI、NDVI、NDMI、NDWI	33/42	

1.4 图像分类法

中国科学院遥感与数字地球研究所何国金团队^[15],利用对燃烧地表高度敏感的植被指数解译灾后植被特征,采用随机森林模型提取火烧迹地;USGS^[16]通过视觉解释火烧迹地周长,并与相对差归一化燃烧指数(rdNBR)等结合增强火烧迹地细节特征,采用半自动机器学习法提取火烧迹地;Hawbaker等^[17]通过归一化燃烧指数(NBR)来解译火灾前后植被变化特征,采用回归树分类法提取火烧迹地。对比相关研究结果,GABAM2015 误差最小,错分误差较 MCD64 产品明显减小,但仍存在较大的漏分误差($OE \geq 30\%$)。

高分卫星遥感数据为获取更加详细的空间细节和长时间序列提供了可能。国内学者利用国产高分一号卫星,根据其高空间分辨率、多光谱与高时间分辨率结合的特点,以及多光谱宽幅覆盖传感器(WFV)空间分辨率 16 m 的优势,基于可见光-近红外植被指数,例如归一化差异植被指数(NDVI)、全球环境监测指数(GEMI)、增强植被指数(EVI)、归一化差异水体指数(NDWI)、过火区识别指数(BAI),进一步加强了对燃烧敏感的植被特征解译,采用回归树分类法开展典型火烧迹地研究,取得初步成效,提取精度达到 80% 以上^[18-20]。

2 火烧迹地信息遥感提取存在的问题及展望

在全球或区域大尺度研究中,高分卫星火烧迹地信息的提取,仍面临两个问题:①是因地形效应导致阴影区与火烧迹地存在反射率相近的问题,②是火烧迹地与病虫害、砍伐林等信息易混淆,以上两个问题导致单纯依靠地表反射率和植被指数无法准确提取火烧迹地。但现有 BA 产品解译标志以地表反射率和植被指数为主(见表 1),忽视了阴影和纹理细节影响,导致火烧迹地提取对小面积火点的遗漏和对混淆信息误判,如何实现阴影、纹理等细节特征的定量解译成为研究的重点和难点。

2.1 通过地形校正减少或消除地形阴影影响

高分卫星遥感影像的阴影干扰不可忽略,迫切需要消除阴影影响已成为研究者的共识^[21-22]。复杂地形下不同位置的像元受太阳入射角、卫星观测角以及地形起伏等因素的影响,所能接收的太阳辐射有很大不同,导致部分像元处于阴影下,产生了“同物异谱”和“异物同谱”现象,对信息提取造成不利影响^[23-24]。自 1980 年代以来,国内外研究者研究出许多地形校正模型^[25],包括基于朗伯框架的 COSIN-T、COSIN-C^[26]、C-correction^[27]和 SCS 模型^[28],非朗伯体框架的 Minnaert 模型^[29],统计经验模型 B-correction^[30]和 VECA^[31],半经验模型 Minnaert + SCS(MSCS)、SCS + C(SC-

SC)和 Modified-minnaert(MM)等^[32-34]。

传统方法中的朗伯、非朗伯框架以及统计经验模型存在许多问题。基于朗伯框架的余弦模型 COSIN-T、COSIN-C 和 C-correction,理论和经验上都被证实不适合森林地形^[35-37],Gu 等人^[28]基于太阳-冠层-传感器三者空间几何结构,提出了太阳冠层传感器校正模型(Sun-Canopy-Sensor,SCS),虽然考虑了植被冠层因素的影响,但普遍认为 SCS 存在过校正现象^[38-39];非朗伯体框架的 Minnaert 校正模型基于双向反射分布函数,同时对太阳与传感器之间的空间光学信息进行了研究,但该模型在复杂地形下精度较低;而 B-correction 和 VECA 模型等统计经验模型,通过建立传感器接收到的辐射能与太阳入射角余弦的经验关系消减阴影影响,模型计算简单,但缺少一定的物理意义,误差较大。

一些半经验模型在一定程度上平衡了精度和复杂性^[39-40]。MSCS 和 SCSC 分别引用了 Minnaert 校正的经验参数 K、用于散射辐射调节的参数 C,改进 SCS 校正朗伯面假设的缺点;MM 模型是一种改进的 Minnaert 模型,通过改进太阳入射角与天顶角的几何关系,保持各像素太阳入射角接近天顶角时的原始自然变化,避免在地形起伏较大地区过校正问题,这三种是适合森林地形常用的传统方法,其中 MSCS 和 SCSC 方法应用较为广泛^[41-43]。在传统半经验方法的基础上提出了改进模型,Sola 等人^[40]提出了基于植被指数和土地覆盖不同的分层方法,进一步改进 SCSC 模型,但该模型需要一定的先验知识和辅助信息场景;林起楠等^[44]通过筛选区域内完全光照和阴影下的水平像元,对入射辐照度和反射率进行修正,提出了 SCEDIL 半经验地形校正模型,该模型能有效地去除阴影干扰,尤其对复杂地形的校正效果显著。

以往研究主要在理想地表的假设下,通过几何关系对地形阴影进行校正,随着遥感技术发展,高程(DEM)数据可以生成模拟真实地表的地形参数(如粗糙度等)。因此,有必要在已有模型(MSCS、SCSC 和 SCEDIL 等)的基础上,基于细化 DEM 参数进一步消除阴影影响,建立阴影校正植被指数,以达到更理想的阴影校正效果,即在地形阴影区增加植被信息、在无阴影的阳坡上抑制植被信息、同时在平坦的地表上保留植被信息。

2.2 通过颜色共生矩阵定量解译火烧迹地纹理细节

纹理以平滑度、粗糙度、精细度、粒度和随机性来反映图像中同质现象的视觉特征,它能够提高卫星的分类能力^[45-46]。遥感影像纹理特征提取方法有灰度共生矩阵法(GLCM)、局部二值模式(LBP)、傅里叶滤波(FFT)、马尔科夫随机场模型(MRF)、小波变换等方法^[10,47],其中 GLCM 一直被认为是一种有效且常用的方法^[48-50],GLCM 纹理被广泛用于森林树种识别、健康状况监测以及蓄积量反演等^[51-54],但 GLCM 纹理应用于火烧迹

地的研究较少。Smith 等^[55]基于雷达卫星利用一阶 GLCM 纹理进行火烧迹地提取,结果表明 GLCM 纹理提高了低空间分辨率影像上火烧迹地的识别能力;Mitri 等^[56]基于 Landsat 卫星提出了火烧迹地半自动面向对象模型,纹理可以使具有相同光谱均值的区域被分离出来,避免了“异物同谱”之间的混淆;Liu 等^[57]优化土地覆盖纹理窗口条件,结果表明纹理特征可以降低不同类型间相似地表反射率引起的误差,上述研究均表明纹理能够增强火烧迹地细节特征,有利于混淆地物的区分。

但 GLCM 只能被提取成灰度图像,颜色信息完全被忽视。为解决这个问题,在计算机视觉和模式识别领域诞生了颜色共生矩阵(color co-occurrence matrix, CCM)的方法^[58],CCM 大多应用于图像检索,它比 GLCM 更能增强纹理特征^[59-60]。研究者们做了许多尝试,将颜色信息集成到 GLCM 中,Shim 等^[61]通过 HSV 颜色空间将对角线元素与非对角线元素结合形成最终直方图,集成纹理图像;Palm 等^[62]提出在 RGB 通道上用 GLCM 描述各自纹理特征,然后将共生矩阵和交叉共生矩阵的特征矢量进行合并获得混合颜色共生矩阵;吴格林^[63]、Benjamin 等人^[64]利用 YCbCr 进行了颜色特征的提取,利用 GLCM 解译图像纹理细节,综合颜色和纹理特征构成了火焰特征向量的检测方法;上述研究采用了简单的颜色与纹理集成,还有一些研究采用了颜色纹理映射方案,既考虑了颜色和强度信息,又考虑了它们之间的相关性。Vadivel 等人^[65]分析 HSV 颜色空间的视觉特性,使用饱和度和强度通道来确定颜色和纹理灰度程度,构建颜色强度共生矩阵;Ledoux 等^[66]、张鑫^[49]基于欧式距离等相似度量,建立了颜色和纹理映射,通过判断颜色纹理特征向量是否相似提取同类像元,欧式距离应用广泛且计算简单,可操作性强;Khaldi 等人^[67]出了一种改进的综合颜色强度共生矩阵,建立基于一组权重分配函数的颜色和灰度纹理映射方案,每个像素被映射到不同的颜色和灰度级。

目前,在火烧迹地少有的纹理研究中,都没有考虑颜色空间,森林燃烧后会产生大量积碳和灰烬,具有独特的颜色和纹理特征,可采用操作性强的欧式距离映射方案,确定纹理窗口大小和角度方向,实现火烧迹地颜色纹理细节的定量解译。

3 结论与讨论

一般火烧迹地发生在地形复杂的山区,消除地形阴影影响采用半经验地形校正模型,在理想地表的假设下,通过太阳、传感器、地形的几何关系校正阴影影响,但通常地形校正后还不能达到理想状态,同一类型的阴阳坡植被仍存在差异,随着遥感技术的发展,通过 DEM 数据可以推导出

模拟真实地表信息的地形参数,如地形粗糙度、地形湿度指数等,因此通过开展阴阳坡植被光谱测量试验,基于细化的 DEM 进一步消除阴影影响,构建阴影校正植被指数,是消减阴影影响的一种新的解决途径;目前火烧迹地提取大多基于地表反射率和植被指数特征,一些研究表明 GLCM 纹理能够突出影像中的燃烧区域,并且可以降低不同类型间相似光谱反射率引起的误差,从而提高精度,但以往研究仅考虑一阶纹理特征,忽略了纹理产生的条件(窗口和角度大小),并且还忽略了积碳和灰烬独特的颜色特征,因此尝试建立颜色空间和灰度纹理映射方案,实现颜色纹理定量解译,突出火烧迹地细节特征,将计算机视觉领域诞生的图像检索方法应用在火烧迹地提取中,是多学科融合方法的探索;基于高分卫星遥感数据,耦合阴影校正植被指数和颜色纹理,优化随机森林模型,希望能够解决小面积火点漏判和混淆信息误判的问题,实现长时间序列高精度火烧迹地信息提取。

参考文献:

- [1] 杨晓丹,赵鲁强,宋建洋,等. 耦合植被与 T639 模式的森林火险气象潜势预报[J]. 科技导报, 2018, 36(8): 87-92.
- [2] 翟洪波,魏晓霞,赵鹏武,等. 中国森林防火形势分析[J]. 林产工业, 2018, 45(4): 43-48.
- [3] SHAN T C, WANG C L, CHEN F, et al. A Burned Area Mapping Algorithm for Chinese FengYun-3 MERSI Satellite Data[J]. Remote Sensing, 2017, 9: 736-753.
- [4] Ruiz J A M, Lúzar J R G, Cano I D Á, et al. Burned Area Mapping in the North American Boreal Forest Using Terra-MODIS LTDR (2001-2011): A Comparison with the MCD45A1, MCD64A1 and BA GEOLAND-2 Products[J]. Remote Sens. 2014, 6: 815-840.
- [5] Chuvieco E, YUE C, Heil A, et al. A new global burned area product for climate assessment of fire impacts[J]. Global Ecology and Biogeography, 2016, 25(5): 619-629.
- [6] Chuvieco E, Loiola J L, Pettinari M L, et al. Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250m reflectance bands and thermal anomalies[J]. Earth System Science Data, 2018: 2015-2031.
- [7] 中国科学院. 遥感地球所发布首幅全球 30m 分辨率火烧迹地分布图[J]. 红外, 2018, 39(5): 50.
- [8] 杨伟,姜晓丽. 森林火灾火烧迹地遥感信息提取及应用[J]. 林业科学, 2018, 54(5): 135-142.
- [9] Mihai A T, Miguel A B, Ekhi R, et al. Burned Area Detection and Mapping: Intercomparison of Sentinel-1 and Sentinel-2 Based Algorithms over Tropical Africa[J]. Remote Sensing, 2020, 12(2): 334-350.
- [10] LIU J. Application of Satellite image time series and texture information in Land cover characterization and burned area detection[D]. University of Helsinki, 2017.
- [11] Roy D P, Lewis P E, Justice C O. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data-a bi-directional reflectance model-based expectation approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1): 263-286.
- [12] Tansey K, Grégoire J M, Defourny P, et al. A new, global, multi-annual (2000-2007) burnt area product at 1 km resolution[J]. Geophys. Res. Lett. 2008, 35: 1-6. doi: 10.

- 1029/2007GL031567.
- [13] Giglio L, Loboda T, Roy D P, et al. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2): 408–420.
 - [14] Giglio L, Boschetti L, Roy D, et al. Algorithm Technical Background Document[R]. MODIS fire products. Version, 2017, 2.
 - [15] LONG T, ZHANG Z, HE G, et al. 30m resolution Global Annual Burned Area Mapping based on Landsat images and Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 489–518.
 - [16] Sparks A M, Boschetti L, Smith A M S, et al. An accuracy assessment of the MTBS burned area product for shrub-steppe fires in the northern Great Basin, United States[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, 24: 70–78.
 - [17] Hawbaker T J, Vanderhoof M K, Beal Y J, et al. Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198: 504–522.
 - [18] 祖笑锋, 覃先林, 尹凌宇, 等. 基于高分一号影像光谱指数识别火烧迹地的决策树方法[J]. *林业资源管理*, 2015(4): 73–78.
 - [19] 孙桂芬. 森林火烧迹地识别及植被恢复卫星遥感监测方法[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
 - [20] 武晋雯, 冯锐, 孙龙或, 等. 基于 Himawari-8 和 GF-1 卫星的林火遥感监测[J]. *灾害学*, 2018, 33(4): 53–59.
 - [21] Liasis G, Stavrou S. Satellite images analysis for shadow detection and building height estimation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 119(9): 437–450.
 - [22] 许章华, 林璐, 王前锋, 等. 归一化阴影植被指数 NSVI 的构建及其应用效果[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(2): 154–162.
 - [23] 焦俊男, 石静, 田庆久, 等. 多光谱影像 NDVI 阴影影响去除模型[J]. *遥感学报*, 2020, 24(1): 53–66.
 - [24] 李丽. 卫星观测及太阳照射方位对植被阴影的影响[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
 - [25] YAN E, ZHAO Y, LIN H, et al. Improving the Estimation of Forest Carbon Density in Mountainous Regions Using Topographic Correction and Landsat 8 Images[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2619–2638.
 - [26] Teillet P M, Guindon B, Goodenough D G. On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1982, 8(2): 84–106.
 - [27] Civco D L. Topographic normalisation of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogramm[J]. Remote Sensing*, 1989, 55: 1303–1309.
 - [28] GU D, Gillespie A. Topographic Normalization of Landsat TM Images of Forest Based on Subpixel Sun-Canopy-Sensor Geometry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 64(2): 166–175.
 - [29] Smith J A. The Lambertian assumption and Landsat data[J]. *Photogrammetric engineering & Remote sensing*, 1980, 46(9): 1183–1189.
 - [30] Vincini M, Reeder D, Frazzi E. An empirical topographic normalization method for forest TM data[C]// *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2002.
 - [31] GAO Y N, ZHANG W C. Variable Empirical Coefficient Algorithm for Removal of Topographic Effects on Remotely Sensed Data from Rugged Terrain[C]// *In Proceedings of the IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS2007)*, Barcelona, Spain, 23-28 July 2007.
 - [32] Reeder D H. Topographic Correction of Satellite Images Theory and Application[M]. Ph. D. Thesis, Dartmouth College, Hanover, NH, USA, 2002.
 - [33] German Aerospace Center. Atmospheric Topographic Correction for Satellite Imagery[EB/OL]. [2016-01-08]. <http://www.doc88.com/p-3867613749158.html>.
 - [34] Soenen S A, Peddle D R, Coburn C A. SCS + C: A modified Sun-Canopy-Sensor topographic correction in forested terrain[J]. *IEEE T rans. Geosci. Remote Sens.* 2005, 43: 2148–2159.
 - [35] Peddle D R, Teillet P M, Wulder M A. Radiometric Image Processing[M]. *Remote Sensing of Forest Environments*. Springer US, 2003.
 - [36] Soenen S A, Peddle D R, Coburn C A, et al. Improved topographic correction of forest image data using a 3-D canopy reflectance model in multiple forward mode[J]. *International journal of remote sensing*, 2008, 29(3/4): 1007–1027.
 - [37] FAN Weiliang, LI Jing, LIU Qinhuo, et al. Topographic Correction of Forest Image Data Based on the Canopy Reflectance Model for Sloping Terrains in Multiple Forward Mode[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 717–732.
 - [38] 刘时城, 温仲明, 陶宇, 等. 不同地形校正方法对刺槐林遥感提取的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(5): 25–33.
 - [39] MA Z, JIA G, Schaepman ME, et al. Uncertainty Analysis for Topographic Correction of Hyperspectral Remote Sensing Images[J]. *Remote Sensing*. 2020; 12(4): 705–728.
 - [40] Sola I, González-Audifana M, Álvarez-Mozos J. The Added Value of Stratified Topographic Correction of Multispectral Images[J]. *Remote Sensing*. 2016, 8: 131–141.
 - [41] Ghasemi N, Mohammadzadeh A, Sahebi M R. Assessment of different topographic correction methods in ALOS AVNIR-2 data over a forest area[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(5): 504–520.
 - [42] 柳潇, 吕新彪, 吴春明, 等. 面向高空间分辨率遥感影像的山地地形校正方法[J]. *地球科学*, 2020, 45(2): 645–662.
 - [43] Bishop M P, Young B W, Colby J D, et al. Theoretical Evaluation of Anisotropic Reflectance Correction Approaches for Addressing Multi-Scale Topographic Effects on the Radiation-Transfer Cascade in Mountain Environments[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11, 2728–2769.
 - [44] 林起楠, 黄华国, 陈玲, 等. 陡峭山区影像的半经验地形校正[J]. *遥感学报*, 2017, 21(5): 776–784.
 - [45] Mryka Hall-Beyer. Practical guidelines for choosing GLCM textures to use in landscape classification tasks over a range of moderate spatial scales[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(5): 1312–1338, DOI: 10.1080/01431161.2016.1278314
 - [46] Venkateswaran K, Kasthuri N, Alaguraja R A. A Combined Detail Enhancing Algorithm and Texture Feature Extraction Method for Supervised Classification of Remote Sensing Images[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2017, 46(4): 1–10.
 - [47] Humeau H A. Texture Feature Extraction Methods: A Survey[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 8975–9000.
 - [48] Hall-Beyer M. GLCM Texture: A Tutorial v.3.0 [R]. 2017.
 - [49] 张鑫. 基于数字图像的纹理特征提取方法研究与改进[D]. 南京: 东南大学, 2016.
 - [50] Park Y J, Guldman J M. Measuring continuous landscape patterns with Gray-Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) indices: An alternative to patch metrics? [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 109: 1–18.
 - [51] Akar Ö, Güngör O. Integrating multiple texture methods and NDVI to the Random Forest classification algorithm to detect tea and hazelnut plantation areas in northeast Turkey [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(2): 442–464.
 - [52] 陈玲, 郝文乾, 高德亮. 光学影像纹理信息在林业领域的最新应用进展[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(3): 1–12.
 - [53] WANG H, LU K, PU R. Mapping Robinia pseudoacacia forest health in the Yellow River delta by using high-resolution IKONOS imagery and object-based image analysis[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(4): 1–10.
 - [54] 汪康宁, 吕杰, 李崇贵. 基于多尺度遥感影像纹理特征的森

- 林蓄积量反演[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 84–89.
- [55] Smith J A . The Lambertian assumption and Landsat data[J]. Photogrammetric engineering & Remote sensing, 1980, 46(9): 1183–1189.
- [56] Mitri G H , Gitas I Z . A semi-automated object-oriented model for burned area mapping in the Mediterranean region using Landsat-TM imagery[J]. International Journal of Wildland Fire, 2004, 13(3): 367–376.
- [57] LIU L , CHEN J , Fieguth P , et al. From BoW to CNN: Two decades of texture representation for texture classification[J]. International Journal of Computer Vision, 2018(11): 1–26.
- [58] 刘丽, 赵凌君, 郭承玉, 等. 图像纹理分类方法研究进展和展望[J]. 自动化学报, 2018, 44(4): 10–33.
- [59] Vanitha M J , SenthilMurugan M. An Efficient content based image retrieval using block color histogram and color co-occurrence matrix [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2017, 12(24): 15966–15971.
- [60] Bhunia A K , Bhattacharyya A , Banerjee P , et al. A Novel Feature Descriptor for Image Retrieval by Combining Modified Color Histogram and Diagonally Symmetric Co-occurrence Texture Pattern [R]. Computer Vision and Pattern Recognition, 3 Jan, 2018.
- [61] Shim S , Choi T S . Image indexing by modified color co-occurrence matrix[C]// International Conference on Image Processing. IEEE, 2003.
- [62] Palm C . Color texture classification by integrative Co-occurrence matrices[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(5): 965–976.
- [63] 吴格林. 基于视频的火焰检测算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [64] Benjamin S G , Radhakrishnan B , Nidhin T G , et al. Extraction of fire region from forest fire images using color rules and texture analysis[C]// International Conference on Emerging Technological Trends. IEEE, 2016.
- [65] Vadivel A , Sural S , Majumdar A K , Human color perception in the HSV space and its application in histogram generation for image retrieval[C]// Proc. of Conf. on Color Imaging X: Processing, Hardcopy, and Applications, 2005: 598–609.
- [66] Ledoux A , Losson O , Macaire L . Texture classification with fuzzy color co-occurrence matrices[C]// IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2015.
- [67] Khaldi B , Kherfi M L . Modified integrative color intensity co-occurrence matrix for texture image representation[J]. Journal of Electronic Imaging, 2016, 25(5): 1–10.

Research Progress and Prospect of Remote Sensing on Extracting Burned Areas Information

WU Jinwen^{1,2}, SUN Longyu³, JI Ruipeng^{1,2}, FENG Rui^{1,2}, YU Wenying^{1,2}, ZHANG Yushu^{1,2}

- (1. *Institute of Atmospheric Environment, CMA, Liaoning Province, Shenyang 110166, China;*
2. *Key Laboratory of Agrometeorological Disasters, Liaoning Province, Shenyang 110166, China;*
3. *Meteorological Bureau of Shenyang, Liaoning Province, Shenyang 110148, China*))

Abstract: The emerging evidence as regards the issue of the increasing degree of harm that forest fires cause to the environment, economy and society has garnered significant attention from both the national and local governments, especially considering China's rapid economic growth, urban economic development, continuous warm and dry climate and combustible accumulation caused by logging ban. Undoubtedly, burned area information is one of the most important information used for describing forest fires and is an important parameter for the study of carbon cycle disturbance and global change. by summarizing the interpretation marks and model algorithms of the products which are still widely used at home and abroad in recent years, previous studies have focused on developing models for extracting burned area algorithms rather than emphasising the effects of detailed features such as shadows and textures in complex terrain, which has restrained accurate extraction and scientific evaluation of burned area information. Therefore, In view of this problem, we put forward the prospect of improving the way to extract the burned area information, the effect of a terrain correction model is first optimised based on digital elevation model parameters for simulating the earth's surface by spectral vegetation test in sunlit and shadow slopes. Meanwhile, vegetation indices are established upon shading correction. Then, by defining the conditions for generating grey texture using the colour co-occurrence matrix and Euclidean space, quantitative interpretation of colour textures is achieved. Finally, the random forest model is optimised. By expounding the influence of coupling of vegetation indices upon shading and colour texture correction on extracted burned area, decrease in missing small-area fire points and erroneous judgement of mixed information to high-precision extraction of burned area information can be achieved. It has typical representative significance in exploring the research and development of burned area products worldwide.

Key words: remote sensing monitoring; burned area; tomographic correction; texture; random forest model