

基于多特征融合的遥感图像林火火焰辨识研究

马晓钰¹
MA Xiaoyu

摘要

在森林区域，由于遥感图像背景单一且林火特征相似度高，传统单一特征辨识法在复杂环境中易受光照变化、烟雾遮挡等外部因素干扰，导致辨识准确率下降。为此，文章提出一种基于多特征融合的遥感图像林火火焰辨识方法。该方法对获取的林火火焰遥感图像进行预处理，包括去噪和直方图均衡化，以提升图像质量并增强火焰特征。从预处理后的图像中精确提取形状、纹理、颜色等关键特征。在特征提取的基础上，采用图像特征交叉熵方法进行多特征融合处理，以解决单一特征辨识易受干扰的弊端。结合色度差和火焰特征向量，实现遥感图像林火火焰辨识。实验结果表明，该方法不仅能够根据色度差有效判断林火的燃烧程度，还显著提升了辨识的稳定性和可靠性。

关键词

多特征融合；遥感图像；火焰辨识；图像去噪；火焰特征向量；色度差

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.12.033

0 引言

森林火灾的频繁发生，已演变成全球共同面临的严峻环境挑战，而这一现象与全球气候变暖的大环境息息相关，气候变暖在一定程度上加剧了森林火灾的发生频率与危害程度，促使其成为世界范围内亟待解决的重大环境难题之一。因此，实现森林火灾的快速、准确辨识，对于遏制火势蔓延、减轻灾害影响具有至关重要的意义。林火辨识研究领域的深入发展，不仅能够显著提升林火监测的精确度和时效性，为森林资源和生态环境的保护提供坚实的技术支撑，还能有效增强应急响应体系的效能，确保在火灾发生时能够迅速、有序地展开救援行动。同时，这一领域的进步也将推动遥感技术的不断革新，促进其在环境监测、灾害预警等领域的广泛应用，为人类社会的可持续发展贡献力量。

针对该问题的研究也已经取得了一定的进展，例如文献[1]提出了基于多分类器融合的林火检测方法；文献[2]提出了基于图像生成和特征融合的复杂背景林火识别方法；文献[3]提出了三通道拟合的改进卷积神经网络林火识别方法；文献[4]提出了基于双光谱图像处理的林火监控与检测方法。然而，上述方法在处理森林地区特有的林火辨识任务时，均面临着因单一特征辨识局限性或未充分考虑外部干扰因素（如光照变化、烟雾遮挡）而导致的辨识效果受限问题。为克服这些弊端，提升林火辨识的准确性和鲁棒性，本文提出一种创新的基于多特征融合的遥感图像林火火焰辨识方法。该方法旨在通过综合多种特征信息，实现对林火火焰的全方

位、多角度识别，从而有效应对森林环境的复杂性和多样性挑战。

1 林火火焰遥感图像预处理

遥感图像在获取和传输过程中，易受大气扰动、传感器噪声等多种因素的干扰，导致图像质量下降。为了更精确地提取火焰特征并有效抑制噪声的负面影响，需要对获取的遥感图像进行预处理。预处理步骤包括去噪、增强对比度、直方图均衡化等。经过上述预处理后，火焰区域在图像中的表现将更加引人注目，其细节特征也更为丰富和明确，这有助于提高火焰辨识的准确性和可靠性。

在遥感图像的获取过程中，受大气条件的不稳定性以及传感器内部机制的微小波动等多种外界与内部因素影响，会不可避免地引入一系列干扰因素。这些干扰因素为图像噪点（设定这 n 个噪点对象分别为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ）。这些噪点严重影响了图像的清晰度，而原始清晰度由一个辨识参数 ε 来衡量。由于遥感技术的复杂性和实施环境的不可控性，导致 ε 的取值无法始终满足理想条件，即存在某些情况下 $\varepsilon=0$ 的取值条件不可能成立，特别是在噪点影响显著时^[5]。为了改善图像质量，提升后续分析的准确性，需要对图像进行去噪处理。这一处理过程的目标是在保留图像重要信息的同时，尽可能减少或消除噪点对图像清晰度的负面影响。图像去噪处理结果 D 为：

$$D = \frac{1}{\sqrt{2\phi S}} d^{\frac{t_1^2 + t_2^2 + \dots + t_n^2}{2\varepsilon^2}} \quad (1)$$

式中： d 表示火焰目标对象的定义向量； ϕ 表示林火遥感图像的清晰度核查参数。经过初次去噪处理后，遥感图像的清晰度仍未达到精准辨识林火火焰目标所需的水平，采用基于方向梯度直方图（histogram of oriented gradients, HOG）特征提取原则的策略，对当前图像进行进一步的二次去噪处理。

HOG 特征提取方法常用于图

像识别领域，能够有效地捕捉图像中的形状和纹理信息，这对于增强火焰特征的显著性尤为关键。在进行二次去噪处理的同时，结合直方图均衡化技术来优化图像对比度。直方图均衡化处理原则如图 1 所示。

0	2	2	2	0
2	1	1	1	2
2	1	1	1	2
2	1	1	1	2
0	2	2	2	0

图 1 直方图均衡化处理原则

其中，“0”区域代表图像中远离直方图中部均衡化区域的像素，这些像素往往对应于图像中的暗部或亮部极端值，可能包含较少的火焰信息或受噪点影响严重；“1”区域则直接对应于直方图的中部均衡化区域，是图像对比度优化的核心区域；“2”区域则指与均衡化区域相邻的像素，这些像素在均衡化过程中会经历较为显著的调整，以更好地融入整体对比度分布。通过直方图均衡化处理，可以使图像的亮度分布更加均匀，火焰区域的亮度与背景之间的差异更加显著，有助于提升火焰辨识的准确性。同时，结合 HOG 特征提取原则进行二次去噪，可以进一步减少噪点对火焰特征的干扰，确保后续提取的火焰特征更加准确和可靠。

2 基于图像预处理的多特征融合策略

在森林区域，遥感图像背景单一，林火特征相似，传统单一特征辨识法在复杂环境中易受光照变化、烟雾遮挡等外部因素干扰，导致辨识准确率下降。为提高火焰辨识的鲁棒性，本文对预处理后的图像进行火焰关键特征提取并进行量化融合。火焰的颜色、纹理和形状等特征是其独特的视觉属性，这些特征在火焰辨识中起着至关重要的作用。颜色特征能够反映火焰的亮度和色调，纹理特征可以描述火焰的细腻程度和边缘信息，而形状特征则能够反映火焰的整体轮廓和几何特性。通过量化并融合这些特征，能够综合考虑多方面信息，以显著提升火焰辨识的准确性，有效应对复杂环境挑战。

林火火焰遥感图像的关键特征广泛涵盖了形状、纹理、颜色以及空间关系等多个维度，这些特征对于实现火焰的精确辨识具有不可或缺的重要性。

（1）形状特征

林火遥感图像的形状特征^[6]所反映出的目标信息与人眼直观感觉并不完全一致。在描述图像目标时，前者更注重对火焰边界的定义，而目测下，两个不同目标的图像形状特征有可能完全相同。

（2）纹理特征

在遥感图像中，纹理特征具有明显的全局化特性。然而，对于林火火焰而言，其纹理特征只能描述出火焰的表面形状，而不能反映出燃烧火焰的本质属性。

（3）颜色特征

颜色特征是基于像素点对象所提取的，在林火遥感图像中，颜色特征是辨识主机定义火焰燃烧区域与非燃烧区域色度差异的主要因素。

（4）空间关系特征

空间关系特征描述了林火火焰目标之间的空间位置和方向关系，能够辅助辨识主机确定火焰燃烧区域在遥感图像中所处的具体位置^[7]。林火火焰图像的空间关系特征 α 满足表达式：

$$\alpha = \max \bar{z} \left(\frac{\bar{z}^2}{\sqrt{z_1 z_2 z_3}} \right) \quad (2)$$

式中： $\bar{z}$ 表示林火火焰图像的实时遥感特征； z_1 表示火焰图像的形状特征描述参数； z_2 表示火焰图像的纹理特征描述参数； z_3 表示火焰图像的颜色特征描述参数； $\bar{z}$ 表示描述参数的平均值。

交叉熵作为一种衡量不同特征间差异性的指标。通常情况下，不同火焰图像特征对应的熵值指标也会有所不同。设 v 表示一个随机选取的火焰图像对象交叉系数，基于系数 v 的交叉熵^[8] δ_v 计算结果为：

$$\delta_v = \frac{1}{C_{xyz}} v \cdot (\beta - 1) \bar{B}^2 \quad (3)$$

式中： β 表示熵向量定义系数； $\bar{B}$ 表示火焰图像目标的交叉性提取特征。

通过计算不同火焰图像特征的交叉熵，可以评估其间的差异性和信息量，进而优化多特征融合的策略，将图像多特征融合结果 V 表达式定义为：

$$V = \sum_{-\infty}^{+\infty} \log \left(\gamma^2 \frac{\delta_v}{|\Delta b|} \right) \quad (4)$$

式中： γ 表示火焰图像目标对象的标准融合参数； Δb 表示目标遥感区域内火焰图像的累积量。

3 遥感图像林火火焰辨识

在林火火焰遥感图像辨识过程中，基于火焰图像多特征融合结果，进一步计算火焰强度、蔓延速度和实时发热量等林火行为指标。这些指标反映了火势的猛烈程度、扩散速度以及火源的能量输出和潜在破坏力，对于精确评估火情严重程度及制定有效的灭火策略至关重要。色度差作为衡量燃烧区域与非燃烧区域颜色差异的关键参数，结合火焰特征向量，共同表征了火焰的燃烧状态和动态变化。基于上述计算得到的林火行为指标和火焰特征向量，能够实现对林火火焰的高

效、准确辨识与识别。

基于林火火焰遥感图像经过多特征融合处理后所获得的丰富信息，可以深入解析并计算出一系列关键的林火行为指标。这些指标具体包括火焰的强度、蔓延的速度以及实时的发热量。

(1) 火焰强度

火焰强度就是指林火在单位时间内的燃烧能力，它反映了火势的猛烈程度。火焰强度 κ 的计算式为：

$$\kappa = \gamma \left(\frac{\tilde{l}}{j} \right)^2 \quad (5)$$

式中： $\tilde{l}$ 表示火焰目标的瞬时燃烧特征； j 表示颜色目标定义特征。

(2) 蔓延速度

蔓延速度是指林火火焰在遥感图像中的扩散速度，它衡量了火势的扩展速率。蔓延速度 μ 的计算式为：

$$\mu = \sqrt{1 - \tilde{l}j} \cdot \gamma \quad (6)$$

(3) 实时发热量

实时发热量是指林火燃烧行为的瞬时代热总量，它反映了火源的能量输出。实时发热量 H 的计算式为：

$$H = \frac{1}{\kappa\mu} D + K^2 \quad (7)$$

式中： K 表示火焰目标的放热能力度量系数。

色度差作为衡量燃烧区域与非燃烧区域颜色差异的关键参数，与融合后的特征向量相结合，能够更准确地反映火焰的燃烧状态和程度。同时，火焰特征向量则进一步细化了火焰的形状、大小、方向等特征，与色度差信息相互补充，共同构成了火焰辨识的完整依据。其中，色度差 e 的求解公式为：

$$e = \frac{\sum_{v=1, o=1} q_v + q_o}{y \cdot H} \quad (8)$$

式中： v 表示燃烧区域内的色度参量取值结果； o 表示非燃烧区域内的色度参量取值结果； q_v 表示基于参数 v 的遥感信息训练参数； q_o 表示基于参数 o 的遥感信息训练参数； y 表示目标数据整合参量。

通常情况下，火焰特征向量取值大于零表示燃烧区域的色度水平明显大于非燃烧区域；火焰特征向量取值小于零，表示燃烧区域的色度水平虽然大于非燃烧区域，但二者差值水平相对较小。设 $\dot{w}$ 表示火焰特征向量，具体的计算步骤如下：

步骤 1：对于每个关键点，计算其与火焰中心的距离 l_i 和与水平方向的夹角 θ_i 。

步骤 2：将所有的距离 l_i 按照从小到大排序，得到一个有序的距离序列 $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ 。

步骤 3：将所有的角度 θ_i 按照从小到大排序，得到一个有序的角度序列 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 。

步骤 4：对距离序列和角度序列进行归一化，得到归一化的距离序列 $\{\hat{l}_1, \hat{l}_2, \dots, \hat{l}_n\}$ 和归一化的角度序列 $\{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_n\}$ 。

步骤 5：将归一化的距离序列和归一化的角度序列连接起来，得到火焰特征向量，其计算公式为：

$$\dot{w} = \{\hat{l}_1, \hat{l}_2, \hat{l}_3, \dots, \hat{l}_n, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_n\} \quad (9)$$

当某区域的色度差超过一定阈值，且其形状、纹理、颜色等特征与火焰特征向量高度匹配时，即可判定为林火火焰。辨识结果公式为：

$$u = e \times \left[\gamma \frac{(1+r)R'}{\theta^2 \dot{w}} \right] \quad (10)$$

式中： u 表示林火火焰遥感图像辨识结果； r 表示图像数据的实时回归向量； R' 表示图像数据的实时定位向量； θ 表示林火遥感图像燃烧区域内的火焰色度值回归系数。

4 实例分析

将某区域作为实验地点，利用 Landsat 遥感以及无人机遥感采集遥感图像，将所采集的数据整合到一个数据集中，将其命名为遥感图像林火火焰辨识实验数据集，该数据集的样本图像数量为 500 张，部分实验样本图像如图 2 所示。

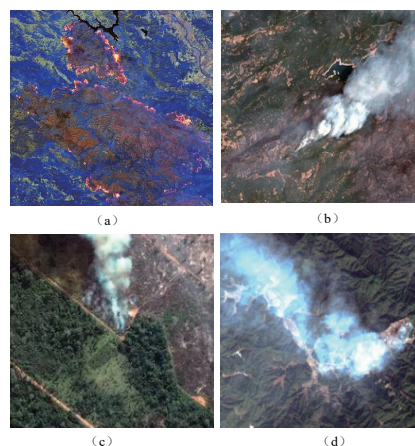


图 2 部分实验样本图像

本次实验的具体执行流程如下：

步骤 1：利用方向梯度直方图方法准确提取图像中的纹理和形状特征，完成遥感图像的预处理。

步骤 2：计算不同火焰图像特征的交叉熵 δ_v ，优化图像多特征融合结果 V 。

步骤 3：基于火焰的强度 κ 、蔓延速度 μ 、实时发热量 H 计算火焰燃烧区域的色度差，当色度差与火焰的特征向量 $\dot{w}$ 高度匹配时，即判定该区域为火焰区域。

步骤 4：将文献 [1] 方法作为对照组 A，将文献 [2] 方法作为对照组 B，将文献 [3] 方法作为对照组 C，将文献 [4] 方法作为对照组 D。

步骤 5：分别求解实验组、对照组燃烧区与非燃烧区的色度差数值，并根据所得结果，总结实验规律。

以图 2 (a) 为例, 划定出燃烧区域与非燃烧区域, 具体的结果如图 3 所示。

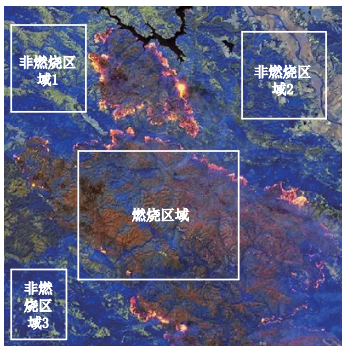


图 3 林火火焰实验遥感图像样例

利用不同方法对遥感图像林火火焰中的燃烧区域进行辨识, 辨识结果如图 4 所示。

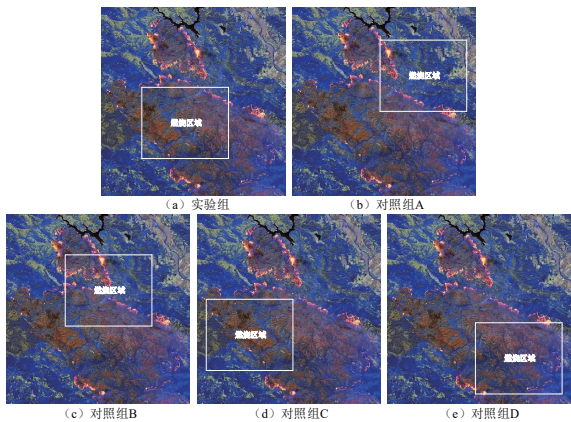


图 4 不同方法的林火火焰燃烧区域辨识结果

由图 4 可知, 对照组在林火火焰燃烧区域辨识中均存在不同程度的偏差。而实验组与图 3 中划定的燃烧区域基本一致, 表 1 记录了实验组、对照组燃烧区与非燃烧区色度的辨识结果。根据表 1 所示实验结果可知, 实验组的色度差最大值达到了 6.28° , 显著高于对照组 A 至 D 的色度差最大值 (在 $4.51^{\circ}\sim 4.6^{\circ}$)。这一结果表明, 实验组的辨识方法能够更为敏感地捕捉到火焰的色度变化, 从而有助于更准确地判断林火的燃烧程度。这一发现符合准确定义林火灾害表现能力的实际应用需求, 证明了该方法的有效性。分析本文方法的优势在于采用了图像特征交叉熵方法进行多特征融合处理。通过

表 1 色度辨识结果

像素点	实验组 /($^{\circ}$)		对照组 A/($^{\circ}$)		对照组 B/($^{\circ}$)		对照组 C/($^{\circ}$)		对照组 D/($^{\circ}$)	
	燃烧区	非燃烧区	燃烧区	非燃烧区	燃烧区	非燃烧区	燃烧区	非燃烧区	燃烧区	非燃烧区
1	7.32	2.01	5.13	2.00	5.08	2.04	5.09	2.01	5.11	2.08
2	7.15	2.19	4.87	2.15	4.91	2.17	4.93	2.16	4.86	2.17
3	7.04	2.20	4.96	2.21	5.14	2.18	5.11	2.20	4.95	2.12
4	7.41	1.63	5.05	1.64	5.06	1.65	5.05	1.63	5.04	1.66
5	6.98	1.09	4.92	1.12	5.03	1.10	5.04	1.11	4.91	1.11
6	6.83	0.58	5.14	0.56	4.97	0.55	4.98	0.57	5.14	0.54
7	6.90	0.62	4.90	0.63	5.12	0.61	5.11	0.64	4.91	0.63
8	7.06	2.00	5.01	2.02	5.05	1.99	5.06	2.01	5.02	2.01

整合形状、纹理、颜色等多种关键特征, 克服了单一特征辨识在复杂环境下易受干扰的局限性。多特征融合能够综合考虑火焰的多方面特性, 即使在光照变化、烟雾遮挡等不利条件下, 也能较为准确地识别出火焰, 并据此评估林火的燃烧程度。为实现遥感图像林火火焰辨识的高效、准确提供了有力支持。

5 结语

本研究提出的基于多特征融合的遥感图像林火火焰辨识方法, 通过综合图像预处理 (包括去噪与直方图均衡化) 以增强图像质量, 并精准地从处理后的图像中提取形状、纹理、颜色等多维度关键特征。该方法的核心在于采用图像特征交叉熵技术进行特征融合, 有效规避了单一特征检测在复杂森林环境中易受外界因素 (如光照变化、烟雾遮挡) 干扰的问题。实验数据充分展示了该方法的优势, 不仅准确依据色度差评估林火的燃烧程度, 还通过多特征融合策略显著提升了检测的稳定性与可靠性, 确保了林火灾害表现能力的精确识别与评估, 展现了其在实际应用中的高度实用性与价值。

参考文献:

[1] 侯逸臣, 何建, 王琳, 等. 基于多分类器融合的林火检测方法研究 [J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(1):53-57.

[2] 徐莉, 符祥, 段宾. 基于图像生成和特征融合的复杂背景林火识别 [J]. 计算机仿真, 2022, 39(4):465-472.

[3] 张海波, 赵运基, 张新良. 三通道拟合的改进卷积神经网络林火识别算法 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11):134-136+140.

[4] 刘兆春, 王学花, 王晨暘, 等. 基于双光谱图像处理的林火监控应用研究 [J]. 滁州学院学报, 2020, 22(5):43-47.

[5] 刘燕, 吴宇兴, 赵俊杰, 等. 引入 MobileNet 的轻量化森林火灾视频监测方法研究 [J]. 微型电脑应用, 2024, 40(5):5-8.

[6] 李巨虎, 范睿先, 陈志泊. 基于颜色和纹理特征的森林火灾图像识别 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2020, 48(1):70-83.

[7] 张明华, 罗红玲, 宋巍, 等. 基于稀疏表示和学习图正则的高光谱图像特征提取 [J]. 光子学报, 2021, 50(4):249-261.

[8] 陈荣, 许宏丽, 杨东学, 等. 一种基于空间编码结构光的稠密三维重建算法 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2021, 48(6):123-130.

【作者简介】

马晓钰 (1997—), 女, 河南郑州人, 硕士, 助教, 研究方向: 计算机视觉、智慧教育。

(收稿日期: 2024-09-11)