引文格式：黄金玉,李百寿,张维裕,等. 基于多元时空属性的景区火灾监测传感器布局研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3): 72-76. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.03.017

基于多元时空属性的景区火灾监测传感器布局研究

黄金玉[1]，李百寿[1*]，张维裕[2]，莫良宏[2]
（1. 桂林理工大学 测绘地理信息学院，广西 桂林 541004；2. 广西北斗星测绘集团有限公司，广西 桂林 541004）

摘　要：以广西桂林七星景区为研究区，基于遥感、地形、POI、信号热力分布差异等时空数据，选取植被、坡度、坡向、建筑物、道路、景点位置和人流密度分布作为火灾风险的评价因子，利用层次分析法、因子加权叠置分析法和自然断点法评估火灾风险，模拟传感器分布，计算并评价景区的真实建设成本。结果表明，基于多元时空属性数据的火灾监测传感器布局方法可以很好地模拟复杂地形地貌环境的景区布局，实现中高风险区的全覆盖，且考虑了硬件成本和地形可达性成本对传感器布局与火灾监测覆盖面积的影响。

关键词：火灾风险因子；层次分析法；火灾监测；传感器；成本分析
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）03-0072-05

Research on the Fire Monitoring Sensor Layout in Scenic Spots Based on Multivariate Spatio-temporal Attribute Data

HUANG Jinyu[1], LI Baishou[1], ZHANG Weiyu[2], MO Lianghong[2]
(1. College of Geomatic Engineering and Geoinformatics, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Beidou Surveying and Mapping Group Co., Ltd., Guilin 541004, China)

Abstract: Taking Qixing scenic spot in Guilin, Guangxi as the study area, based on the spatio-temporal data such as remote sensing, topography, POI, signal thermal distribution difference, taking vegetation, slope, aspect, building, road, scenic spot location and pedestrian density distribution as fire risk evaluation factors, we used the analytic hierarchy process, factor weighted superposition analysis and natural breakpoint method to evaluate the fire risk, simulated sensor distribution, and calculated and evaluated the real construction cost of scenic spot. The results show that the layout method of fire monitoring sensors based on multivariate spatio-temporal attribute data can well simulate the layouts of scenic spots with complex terrain and geomorphic environment, and achieve full coverage of middle and high risk areas, and consider the influence of hardware cost and terrain accessibility cost on sensor layout and fire monitoring coverage area.

Key words: fire risk factor, analytic hierarchy process, fire monitoring, sensor, cost analysis

火灾往往给景区自然、人文乃至历史环境造成极大破坏，进而阻碍国家旅游业发展。近年来我国景区发生了多次火灾，如云南省国家4A级景区临沧市沧源佤族自治县翁丁原始部落文化旅游区火灾，大火烧毁老寨房屋104间，造成直接财产损失813.48万元；浙江省杭州冰雪大世界重大火灾事故造成13人死亡、15人受伤，过火面积约为2 258 m^2，直接经济损失1 789.97万元；2019年12月6日广西桂林市七星尧山景区人工采蜜诱发景区森林大火，消防部门动用了10辆消防车、270余人、1架直升机花费近10 h扑灭大火，导致200亩山林资源损失；龙胜县龙脊梯田景区由于竹木建筑物分布密度过大诱发建筑物大火蔓延；山西省台骀山景区火灾致13人死亡、15人受伤。由此可见，火灾在损失程度和扑救成本方面均对社会、景区影响巨大。游客运动轨迹的随机性和景区易燃地物的分布决定了景区火灾发生和扩散的空间分布特征。山凹地势最低，通常空气湿润、日照量较少，植被发生自燃的可能性较小，但此处游客容易到达，在灌木零星且通行通畅的情况下，极可能诱发人为火灾。一些火灾发生在地形坡度变化剧烈处，并快速蔓延到高处，伴随有浓烟产生，因此火焰和浓烟的发生与地形起伏密切相关[1]。景区内的建筑物和人工搭建设施采用的木质材料和装饰品大多耐火性较差且空间密度较大，起火后会迅速蔓延。火灾自动报警系统的任务为处理和剔除火灾

项目来源：桂林市科学研究与技术开发计划资助项目（20220124-24）。
第一作者简介：黄金玉（2001—），本科，技术员，主要研究方向为火灾监测与传感器布局，E-mail：2265210257@qq.com。
通信作者：李百寿（1980—），博士，教授，主要研究方向为空间数据智能处理与理解，E-mail：lbszhb@163.com。

报警控制器发送报警信号中的干扰，及时正确地判断火灾是否发生，获取火情位置，并判断火灾发生程度信息[2]。支持火灾自动报警系统的火灾监测传感网络是消防火灾自动报警系统中对现场进行自动探查并发现火灾的监测设备。火灾监测传感器布局是火灾监测预警的重要基础，部分学者[3-6]对其进行了研究，但针对室内火灾监测预警传感器布局的研究较多[7-8]，对复杂地形地貌环境旅游景区的火灾监测传感器布局的研究较少。因此，本文采用多元时空属性数据对复杂地形地貌景区的火灾监测传感器布局进行了研究。

1　基于多元时空属性的传感器布局

景区通过制作火灾风险分类区划图对火灾监测传感器重点监测区域进行初步定位，通常采用知识驱动、定性的风险评估方法[9-10]对火灾风险进行评价和制图。该方法主观性较强，缺乏多元时空属性数据驱动定量、半定量的风险评估。为更好地进行风险评估和布局，结合景点分布、人流密度分布、实地调查POI、地形、高分影像，通过对视高点的可视域分析，确定传感器候选点的准确位置。布局中考虑多种硬件布设成本和可达性成本，针对景区特点制定科学合理且低成本的方案。结合遥感影像设计初步布局方案，再利用实地调查POI数据进行优化，通过采集的POI信息对不同监测区域所需的火灾监测传感器进行分类，获得与景区复杂地形地貌、火灾风险条件相符的布局方案。基于多源时空属性数据的景区火灾监测传感器布局方法的主要步骤为：①结合森林景区火灾诱因确定目标景区火灾发生与火势发展的影响因素；②通过地形分析和目视解译方法获取火灾风险因子空间分布；③根据信号热力分布差异等时空数据生成人流密度分布专题图；④根据景点分布生成景点空间缓冲区专题图；⑤采用层次分析法确定各火灾风险因子的权重，通过构建模型计算目标景区的火灾风险指数，利用自然断点法获得火灾风险区划图；⑥根据火灾风险区划图、景区视高点的可视域分析结果以及实地POI数据设计景区的火灾监测传感器布局；⑦对多种目标条件优化方案进行可达性和硬件成本分析，获得成本最优的布局结果。

2　景区的多元时空属性数据

通过谷歌地图和手持GNSS工具采集景点位置、空间范围和属性数据，并将数据输入ArcGIS的Shape文件中。景区DEM可清晰展现景区不同景点的高程和地形差异，并通过GIS软件进一步提取与火灾发生、发展密切相关的坡度和坡向因子数据。高分遥感影像来源于天地图遥感影像系统，利用LocaSpace Viewer软件下载。由于该系统下载的影像可达亚米级精度，地面分辨率较高，清晰度优于同期谷歌影像。通过该影像可解译标记与火灾风险指数密切相关的植被、建筑物、道路、广场等火源地和火灾发展空间中的易燃物分布信息。通过实地调查获得火灾监测传感器位置和火灾风险评价因子信息的POI数据。该数据包括景区不同地势植被覆盖类型分布和覆盖度、建筑物的分布环境与易燃材质、不同路段对火势发展的影响差异。利用BIGEMAP软件和位置定点拍照的方式记录POI数据。从百度地图中导出景区主要时段信号热力分布差异数据。热力分布差异数据可清晰展示不同时段景区的人流密度分布及其变化规律信息，用于阐释景区人流密度导致的火灾空间概率分布。

3　景区火灾风险因子分类与评价

3.1　火灾风险因子分类

火灾风险因子可分为自然属性和人文属性因子，自然属性因子通过植被、坡度和坡向挖掘，人文属性因子通过景点位置、建筑物和道路分布、人流分布密度挖掘。

1）植被因子。目标景区植被覆盖度高且种群丰富，植被因子可分为乔木、灌木、草地等。植被种群复杂，植被因子易燃性空间分布差异较大。

2）地形因子。在地形因子分析中，通过DEM数据计算的坡度和坡向是主要因子。坡向影响单位面积接收的能量、温度、湿度，坡度影响日照、土壤流失等。本文将坡向划分为阴坡（0~45°、315~360°）、半阴坡（45~135°）、阳坡（135~225°）、半阳坡（225~315°）4类；将坡度划分为平坡（0~5°）、缓坡（5~15°）、斜坡（15~25°）、陡坡（25~30°）4类。

3）人文环境因子。2023年我国旅游业获得了前所未有的发展，各景区人满为患，人流聚集效应明显，人流运动轨迹的随机性和景区易燃地物的分布是导致火灾发生和难以全面监测的重要原因，且人流聚集效应将为火灾产生带来隐患。本文从人流分布和密度以及景点位置、道路网、建筑物等方面来分析目标景区的火灾风险等级。利用ArcGIS缓冲区分析工具提取景区目标地类火情人文环境因子分布，形成道路、

景点和建筑物矢量图；建立距离道路0~4 m、4~10 m、10 m以外的3级缓冲区；建立距离景点位置0~10 m、10~20 m、20~30 m、30~50 m、50 m以外的5级缓冲区；建立距离建筑物周围范围0~3 m、3~6 m、6 m以外的3级缓冲区。通过百度地图App采集目标景区节假日、周末和非节假日，景区开放和不开放以及一天中早中晚不同时段的手机信号热力分布差异数据，按照人流密度分布分级原则，形成人流分布分级。

3.2 景区火灾风险评价

在多元时空属性空间数据处理的基础上，通过火灾风险因子分析技术确定因子权重，对火灾风险因子进行加权叠置分析，得到景区的火灾风险指数或易发性指数。

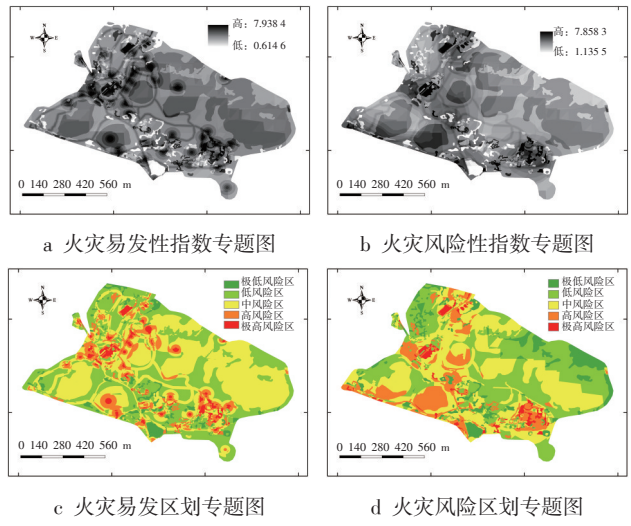
1）模型构建。火灾风险指数的计算公式为[11]：

$$F=\sum_{i=1}^{n}x_i w_i$$

式中，x_i为火灾致灾因子；w_i为火灾致灾因子的权重。各指标火灾风险等级的量化分级由低到高用1、3、5、7、9表示，中间级别用2、4、6、8表示。

2）权重确定。将目标景区的火灾风险预测模型分为3类指标：①植被类型，即植被覆盖处燃烧的物质基础及其火灾发生的行为主体；②火灾发生和蔓延的地形条件，包括坡度、坡向；③人文环境火源条件，包括道路网、建筑物、景点位置和人流密度分布。为了评价火灾风险因子之间的权重关系，本文采用层次分析法[12]确定因子权重，结果表明，各因子火灾易发性权重为人文环境因子0.508 1（道路缓冲区0.101 5、建筑物缓冲区0.159 2、景点位置缓冲区0.247 4）、植被因子0.385 4、地形因子0.106 5（坡度0.041 6、坡向0.064 9）；各因子火灾风险性权重为人文环境因子0.498 5（道路缓冲区0.090 3、建筑物缓冲区0.154 0、人流密度分布0.254 2）、植被因子0.412 9、地形因子0.088 6（坡度0.033 9、坡向0.054 7）。结合前人研究成果[13]发现，植被因子的权重最大，其次为人文环境因子，再次为地形因子。

3）火灾易发区和风险区指数计算与重分类。火灾发生与景点的空间分布密切相关，基于景点位置缓冲区等多元时空属性数据，采用因子加权叠置分析法计算易发性指数（图1a）。火灾风险性与人流密度分布因子密切相关，基于人流密度分布等多元时空属性数据，采用因子加权叠置分析法计算火灾风险指数（图1b）。采用自然断点法将两种指数分为极高风险区、高风险区、中风险区、低风险区和极低风险区5个级别（图1c、1d）。



a 火灾易发性指数专题图　b 火灾风险性指数专题图

c 火灾易发区划专题图　d 火灾风险区划专题图

图1 火灾风险指数计算与区划

4 传感器布局

4.1 景区监测点选择与视域分析

视域是监测点的可视范围[14]，在目标景区选择相对视高点进行可视域分析（图2）。通过ArcGIS的视域工具得到各点的视域和不可视区域，并对各点可视域覆盖范围进行排序，找出覆盖范围最大的点，在后续研究中据其判断峰上火灾监测传感器布局的必要性。已知各点在平均高程为250 m处的视域覆盖范围排序为7>6>5>4>8>1>2>3，以平均高程为监测点高度，将所有监测点的视点高度提高5 m进行可视域分析，可视域范围明显增大，其可见范围排序也发生了变化，即7>6>5>4>2>8>1>3。比较两次排序发现，前4个视点的排序未发生变化，但它们之间的像元个数很相近。视高点的可视范围与点的位置和高程相关，架设云台视频监测器时可适当增加视点高程。6号点和7号点的可视域范围差距较小，且6号点的可见域范围更广，但可见域范围像元数量小于7号点。考虑到主要监测区域的分布，架设云台视频监测器时选取7号点位。

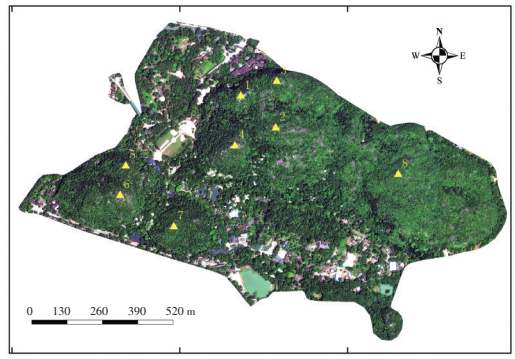


图2 视高点选择

4.2　布局条件

根据景区监测需求和火灾监测传感器的特性设计传感器布局[15]，首要考虑的布局条件为：

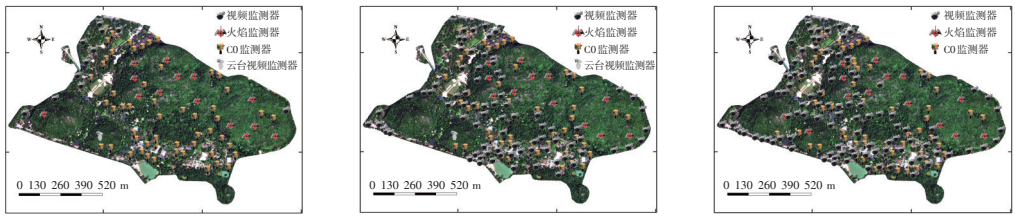
1）着重考虑在景区火灾风险等级较高的区位布局传感器的数量，由于该区位通常有较多的游览设施、建筑物和商业摊位且地势较开阔，有利于视频监测器的布设，不适于CO监测器的布设。

2）对于在视高点架设云台视频监测器的情况，在该点可视与不可视界限交界区位布设一定数目的其他类型监测器。由于火灾往往是从局部区位发生的，因此风险较大的区位需布设更多的监测器，使监测器能严密覆盖高风险区位，视频监测器在可视域内完成视域更广的区位监测。

3）对于通行不便或植物类型较复杂的情况，在空气流通性差的区域布设少量的CO监测器完成区位监测，在流通性好的区域CO监测器更多布置在视频监测器非可视域内。林地内部植被密集，布设难度大，可达性成本高，因此在林地外围视野较好的区位布设视频监测器十分有效。

4.3　布局与结果

根据可视域的计算结果寻找适合架设云台视频监测器的视高点，实现视频监测传感器的最大监测范围。在景区的视高点放置云台视频监测器，在非可视域采用CO或火焰监测器完成火灾监测布局。根据重点区位监测、扩大区域监测、成本最优的监测原则，分别设计了3种布局方案（图3），方案一是先找到适于安装云台视频监测传感器的视高点以实现最大的监测范围，再采用CO或火焰监测器完成整个景区的火灾监测；方案二是在方案一的基础上根据实地情况重新选择视频监测器的位置；方案三不架设云台视频传感器，而在景区布设视频、火焰、CO监测器实现传感器布局。方案一能有效监测沟峰间地形区位，在通视良好处对喀斯特石林区域山体裸露部分进行视频监测，而在密集植被林地则采用火焰或CO检测器监测；方案二主要布设视频监测器，在视线受阻的情况下采用火焰或CO检测器进行辅助监测，可减少成本、增加覆盖面，监测范围不仅覆盖了中高风险区域，还包括监测盲区的山体；方案三采用视频监测器监测重点人流区域，火焰监测器监测狭窄地形山地和林地区域，CO检测器监测人流量小且视频监测器视线受阻的区域，采用了大量的CO、火焰和视频监测器，实现了高风险区的高密度监测。



a 方案一　　b 方案二　　c 方案三

图3　不同布局条件的监测结果

按照2023年火灾监测传感器的市场价格，激光云台摄像机均价为1.52万元、视频监测器均价为400元、火焰探测器均价为7 000元、CO监测器均价为666元，方案一、方案二、方案三的硬件总成本分别为15.3万元、16.6万元、24.5万元。

5　结　语

近年来我国旅游业发展迅猛，并逐步成为国民经济中的重要发展产业。然而，旅游业的安全保障不足也较明显，特别是在景区发生火灾时难以及时发现和控制。通过构建地面传感网络获取火灾监测预警的实时精准信息，结合景区实际情况进行适合的火灾探测器布局非常重要，探测器布局将直接影响火灾监测的效果。针对现有监测技术对复杂地貌环境景区火灾监测不足等问题，本文以广西桂林七星景区为研究区，采用多元时空属性数据对火灾监测传感器的布局和监测范围进行了空间优化研究。结果表明，本文方法是可行的，不同景区可采用满足不同目标条件、硬件建设、可达性成本的方案，实现不同条件下的布局优化。基于多元时空属性数据的火灾监测传感器布局方法可以很好地模拟复杂地形地貌环境的景区布局，在视高点架设云台视频传感器监测范围更广。由于空旷处CO探测器等气体监测器对火灾发生不敏感，因此在地形平坦、空气流通好、人流密度大的区域采用视频监测器可以降低成本。由于极高风险区和高风险区在节假日火灾风险等级较高，而非节假日较低，根据

火灾风险分级动态图可进一步实现景区的节假日和非节假日监测成本动态优化。

参考文献

[1] 何世荣,樊当民. 浅析森林燃烧性与森林特性的关系[J]. 现代农村科技,2019(8):89

[2] 宋仁豪. 基于火灾风险评估的中小型城市消防设施布局优化研究:以吉安市中心城区为例[D]. 南昌:江西师范大学,2021

[3] 马可天,王佳. 基于BIM模型的火灾探测器自动布置方法研究[J]. 科学技术与工程,2022,22(26):11 472-11 478

[4] 闫秀宝. 地铁车站公共区火灾探测器类型选择[J]. 电工技术,2023(6):66-67

[5] 杨政勃. 工业危废贮存库的火灾探测器选型设计[J]. 今日消防,2019,4(2):28-29

[6] 林嘉俊. 室内滑雪场火灾自动报警设计探讨[J]. 广东土木与建筑,2022,29(4):93-95

[7] 苗程宾. 基于物联网的火灾自动报警系统设计[C]//中国消防协会学术工作委员会,中国人民警察大学防火工程学院. 中国消防协会学术工作委员会消防科技论文集,2022:389-392

[8] Lau K C,Lai K K,Lee P Y,et al. Fire Risk Assessment with Scoring System , Using the Support Vector Machine Approach[J]. Fire Safety Journal,2015,78:236-245

[9] 刘晗,王健. 基于Fine Kinney和Dematel理论的城市火灾风险评估[J]. 消防科学与技术,2018,37(12):1 730-1 734

[10] Li S Y. Fire Risk Assessment of High-rise Buildings Based on Gray-FAHP Mathematical Model Procedia Engineering[J]. Procedia Engineering,2018,211:395-402

[11] 安佳怡,冯仲科,马天天,等. 基于GIS格网的重庆合川区森林火险等级区划[J]. 中南林业科技大学学报,2022,42(9):91-101

[12] 陈羚,陈锋,牛树奎,等. 北京鹫峰景观格局空间特征与森林火险的关联分析[J]. 北京林业大学学报,2021,43(6):41-49

[13] 于成龙. 基于GIS和RS森林火险预测的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2007

[14] 王彦卷,张佳瑜,侯景伟. 基于地形分析的山区森林火灾监控点选址方法[J]. 林业资源管理,2020(2):135-140

[15] 谢春红. 火灾自动报警系统中的探测器分析[J]. 电子技术,2022,51(10):216-217

(上接第53页)

租赁政策、居民租赁偏好会对租金产生较大影响，因此未来模型中应考虑加入这些变量以更全面地分析租金的影响因素。在模型算法方面，机器学习方法能更好地处理变量之间的非线性关系，未来需要在这方面研究改进。

参考文献

[1] 肖周燕,李慧慧. 中国主要城市群人口迁移倾向研究:基于百度指数的应用[J]. 人口与经济,2021(4):22-36

[2] 深圳市住房和建设局. 深圳市住房发展“十四五”规划[R]. 深圳:深圳市住房和建设局,2022

[3] 占益峰. 深圳住房租赁市场供需失衡问题与对策研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021

[4] 程兰兰. 中国房价、房租与人口流动关系研究[D]. 武汉:中南财经政法大学,2020

[5] 何羽骏. 深圳市公共租赁住房分配问题研究[D]. 深圳:深圳大学,2019

[6] 汤坤,李全,陆江潇,等. 公共服务设施可达性及其对房价的影响[J]. 地理空间信息,2020,18(2):90-93

[7] 崔娜娜,崔丹,肖亮. 城市住房租金价格影响因素的空间计量分析:基于GWR模型对北京市数据的分析[J]. 价格理论与实践,2020(5):45-48

[8] 李彤. 昆明市住宅租金价格影响因素的空间计量研究[D]. 昆明:云南财经大学,2022

[9] 卢宾宾,葛咏,秦昆,等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(9):1 356-1 366

[10] 张菲凡,韩念龙,纪旭,等. 基于GWR模型的房价空间影响因素研究:以海口市海甸岛为例[J]. 地理信息世界,2022,29(1):52-57

[11] 汪佳莉,季民河,邓中伟. 基于地理加权特征价格法的上海外环内住宅租金分布成因分析[J]. 地域研究与开发,2016,35(5):72-80

[12] Li Z Q,Fotheringham A S. Computational Improvements to Multi-scale Geographically Weighted Regression[J]. International Journal of Geographical Information Scienc,2020,34(7):1 378-1 397

[13] 沈体雁,于瀚辰,周麟,等. 北京市二手住宅价格影响机制:基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. 经济地理,2020,40(3):75-83

[14] 深圳市统计局,国家统计局深圳调查队. 深圳统计年鉴[S]. 北京:中国统计出版社,2022