

基于山火跳闸敏感度的南方电网输电线路山火跳闸时空分布统计

吴骏¹, 周游¹, 周恩泽², 王磊², 马瑞康¹, 魏瑞增²

(1. 长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室, 长沙 410114; 2. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室(广东电网有限责任公司电力科学研究院), 广州 510080)

摘要: 近年来受极端天气影响, 山火事件频发, 导致南方电网山火跳闸事件显著增多。为探究输电线路山火跳闸的主要影响因素及其作用规律, 收集了近5年南方电网地区输电走廊的山火告警与跳闸事件数据, 结合气候、地形及地表植被等因素, 从时间与空间两个维度开展统计分析。同时, 提出“输电线路山火跳闸敏感度”概念, 用于表示单位山火告警次数下的山火跳闸概率, 有效规避了统计分析中“相关即因果”的逻辑谬误。最后, 结合火焰蔓延模型与空气击穿模型, 深入剖析了环境因素影响规律背后的物理机制。结果表明: 尽管南方电网的山火告警与跳闸事件逐年增加, 但得益于电网山火监控手段的多元化及灭火措施的及时性, 山火跳闸敏感度总体呈逐年下降趋势。该研究结论将有助于电网运维人员针对现场环境制定更具针对性与差异化的山火治理策略。

关键词: 山火跳闸敏感度; 山火告警; 输电线路山火跳闸; 时空分布

Statistics on Temporal and Spatial Distribution of Wildfire Tripping on Transmission Lines of Southern Power Grid Based on the Sensitivity of Wildfire Tripping

WU Jun¹, ZHOU You¹, ZHOU Enze², WANG Lei², MA Ruikang¹, WEI Ruizeng²

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Guangdong Electric Power Equipment Reliability Enterprise Key Laboratory, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: In recent years, affected by extreme weather, frequent wildfires have led to a significant increase in wildfire tripping incidents in the Southern Power Grid. To investigate the main influencing factors and their mechanisms behind wildfire tripping of transmission lines, data on wildfire warnings and tripping incidents along transmission corridors in Southern Power Grid region over the past five years are collected. Statistical analysis is conducted from both temporal and spatial dimensions, incorporating factors such as climate, terrain, and surface vegetation. Additionally, the concept of "transmission line wildfire tripping sensitivity" is proposed to represent the probability of wildfire-induced tripping per unit of wildfire warnings, effectively avoiding the logical fallacy of "correlation implies causation" in statistical analysis. Finally, by integrating flame spread models and air breakdown models, the underlying physical mechanisms of environmental factor influences are thoroughly analyzed. The results indicate that although wildfire warnings and tripping incidents in Southern Power Grid have increased year by year, thanks to diversified wildfire monitoring methods and timely firefighting measures, the overall wildfire tripping sensitivity has shown a declining trend annually. The findings of this study will assist grid operators in developing more targeted and differentiated wildfire management strategies based on field conditions.

Key words: wildfire tripping sensitivity; wildfire alert; wildfire tripping on transmission lines; temporal and spatial distribution

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177070); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20222559, GDKJXM20231429)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177070); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GDKJXM20222559, GDKJXM20231429).

0 引言

近年来,受极端天气、人为活动等因素影响,林区山火频发。输电线路不可避免地途经山区林地,一旦林地发生山火,高温、烟尘及外部火焰会导致线路间隙绝缘强度大幅下降,引发相间或相地击穿,严重威胁电网的稳定运行^[1]。美国加州山火曾造成17.2万户居民用电受影响,直接经济损失达190亿美元^[2]。仅2023年,南方电网辖区内由山火引发的110 kV及以上线路跳闸次数就达到110次。

掌握山火发生及线路山火跳闸的时空分布规律,有助于现场运维人员开展差异化的山火运维与防治工作。国内外学者已先后针对输电走廊山火及跳闸事件开展统计分析研究。文献[3]对浙江省2000—2016年的山火及其影响因子进行了统计分析,指出气象、植被和人为因素是影响山火发生的3类主要因子。文献[4]利用不同卫星数据集对澳大利亚北部山火事件展开统计,强调了气象条件对山火告警的重要性。不过,这类研究多聚焦于山火的时空分布,尚未建立山火事件与输电线路山火跳闸之间的内在联系。文献[5]对南方电网2009—2014年500 kV及以上输电线路的山火跳闸情况进行了统计分析,指出人为因素是导致我国山火发生的主要诱因。文献[6]统计了2015—2020年南方电网110 kV及以上输电线路的山火跳闸事故,发现中午时段、海拔500 m以下且坡度在30°以下区域的山火跳闸次数最多,应作为重点防范对象。但上述研究仅对山火引发的跳闸事故进行了统计,未考虑山火告警与跳闸之间的关联。由于输电线路山火跳闸是山火告警后线路绝缘击穿的现象,山火告警事件较多的地区,线路跳闸次数通常也会相应增加。若仅单一分析山火告警或山火跳闸的分布,可能会陷入“相关即因果”的逻辑谬误。

因此,本文基于统计学方法提出线路山火跳闸敏感度的概念,针对南方电网近5年的山火告警及山火条件下的线路跳闸事件开展时空分布统计分析,从年度、月度、时段3个时间维度剖析南方电网山火跳闸敏感度的变化趋势及其深层原因。结合地理信息软件统计分析南方电网山火跳闸的空间分布与影响因素的关联,借助山火跳闸模型对山火跳闸敏感度的变化规律进行定性分析,并针对性地提

出山火运维治理的相关建议。

1 输电线路山火告警及跳闸时间分布

1.1 年度分布

图1展示了国家卫星气象中心提供的2010—2023年南方电网管辖五省(区)范围内,通过卫星广域监测获取的火点年度分布情况。可以发现,近年来山火数量呈快速增长趋势。不过需要注意的是,2010—2018年观测阶段的年均火点数量均不足10 000次。这是因为该时间段南方电网的山火监测主要依赖极轨卫星(如Aqua、NOAA等)受限于每日2~4次过境扫描(空间分辨率为1 km×1 km)的时空采样不足,火点漏检率较高。自2019年起,Himawari-8与GK-2A双静止卫星先后投入业务化运行,实现了24 h全境覆盖的10 min级高频山火监测,使得全区域的火点年告警数量出现阶跃增长。此外,南方电网山火监测预警中心对广域卫星监测到的山火热点数据采取了优化措施:在空间维度上,利用GIS分析精准界定输电通道3 km范围,剔除无关火点;在属性验证方面,结合地面巡检与人工核实,排除工业热源、光伏反射等干扰,最终建立了一个高可信度的山火事件数据库。

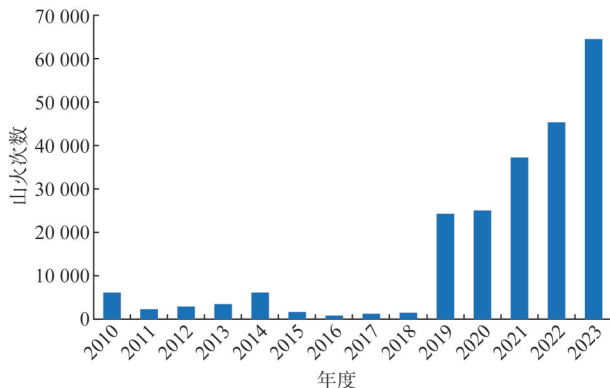


图1 南方电网广域卫星山火热点年度分布

Fig. 1 Annual distribution of satellite wildfire hotspots in China Southern Power Grid's wide area

本文旨在利用统计学思想研究山火对输电线路跳闸的影响规律。考虑到仅发生在输电通道附近的山火才有可能诱发线路发生跳闸,因此,本文重点分析近5年(2019—2023年)南方电网管辖境内输电通道3 km范围发生的山火告警以及对应的线路跳闸信息。其中山火告警和线路山火跳闸的年度变化如图2所示。近5年来输电走廊山火告警次数呈现

逐年上升的趋势,2023年年度告警达4 000余次。这可能是由于全球气候变化和监测手段增加共同导致。以广东省为例,2019年广东省年均气温为 20.5°C ,而2023年年均气温上升至 23.9°C ^[7]。年均气温的升高意味着春季提前到来,秋季延后结束,这样火灾季节变得更长,从而使得山火发生概率提高。另一方面,南方电网建立了专业的卫星数据接收处理平台。针对静止卫星提出了时空融合山火监测告警方法^[8],大大降低了漏告警的可能。山火告警次数逐年增加意味着输电线路面临的,山火风险变大,同时也增加了运维人员的工作量,需要投入更多的资源进行山火防治。

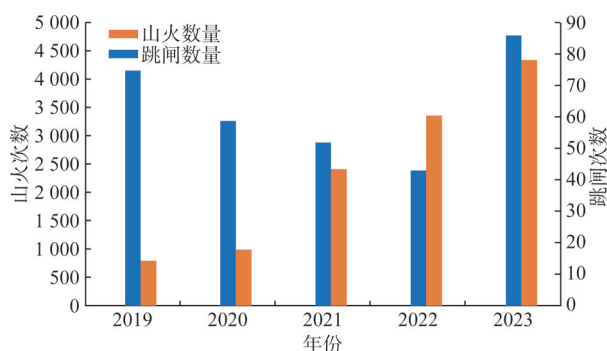


图2 南方电网山火告警次数和线路跳闸数量年度分布

Fig. 2 Annual distribution of wildfire alarm counts and power line tripping numbers in China Southern Power Grid

另一方面,由于南方电网近年来重视山火的告警和防控,山火引起输电线路跳闸次数自2019年起逐年下降。但在2023年输电线路跳闸次数出现了显著增加,这可能与山火爆发次数的增加直接相关。

因此,本文将输电线路山火跳闸敏感度定义为输电线路山火跳闸次数与输电走廊内山火告警次数的比值,该值越大,表明单位山火告警次数下引发山火跳闸的概率越高。近5年南方电网输电走廊山火跳闸敏感度如图3所示:2019—2022年期间敏感度逐年下降,从2019年的9.35%降至2022年的1.30%。这主要得益于近年来南方电网山火监控手段的多元化发展与监测效率的提升,相关运维部门能够在输电线路跳闸前及时采取灭火救援措施。2023年山火跳闸敏感度虽有回升,但幅度并不明显,这意味着输电线路山火跳闸次数的增加主要由山火灾害频次上升所致,而非运维部门处置不及时。因此,在极端气候条件下电网应加强与地方政

府、森林草原防灭火指挥部等相关部门的沟通协作,强化电力设施防山火警示与案例教育,同时在山火高发期加强重载直流输电线路及重要输电通道的运维管理与特巡特护,从根源上减少山火的发生。

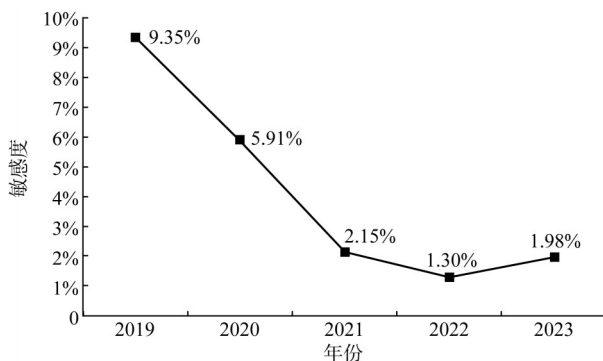


图3 南方电网山火跳闸敏感度逐年分布

Fig. 3 Annual distribution of wildfire tripping sensitivities in the China Southern Power Grid

1.2 月度分布

图4—5分别统计了输电走廊山火告警与线路山火跳闸的月度分布情况。两者的年度月度分布规律基本一致,呈现出显著季节性特征:夏季山火告警与线路跳闸次数较少,9月起开始逐步出现,在冬季春节期间及春季清明前后达到高峰。南方五省(区)在春冬季节气候干燥少雨,加之秋收后枯枝落叶大量堆积,为山火燃烧创造了条件;同时,这两个季节人类农事活动与节日庆典明显增多,燃放烟花爆竹、焚烧香纸及农事烧荒等行为,进一步提高了山火发生概率。

山火跳闸现象集中分布在3—5月份。结合输电线路山火跳闸敏感度月度分布(图6)可知,这些月份的山火跳闸敏感度远高于春冬季节。这是因为春冬季节电网已做好相关防护措施,跳闸现象较少。而进入春季后,南方大部分地区天气转暖且出现季风,山火火势更为剧烈,因此山火跳闸现象在3月开始增加。山火告警与跳闸的季节性分布表明,山火高发期输电线路的维护和修复工作量会相应增加。

1.3 时段分布

图7为输电线路山火告警与跳闸的时段统计结果。山火告警和跳闸数量总体呈先增后减的趋势,集中发生在白天14:00—18:00。不过,与跳闸事件

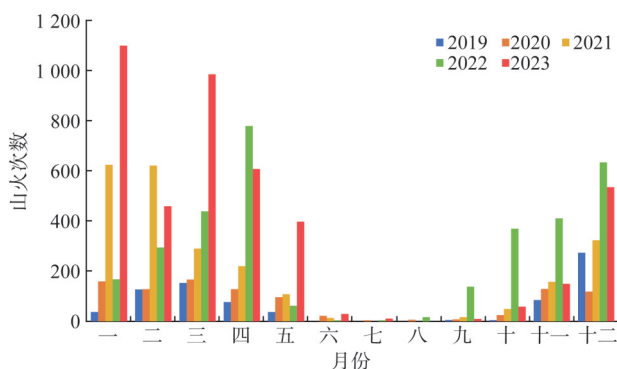


图4 南方电网输电走廊山火告警月度分布

Fig. 4 Monthly distribution of wildfire alerts in China Southern Power Grid's transmission corridors

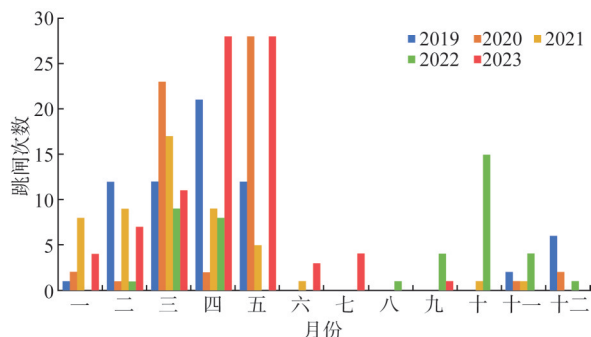


图5 南方电网输电线路山火跳闸月度分布

Fig. 5 Monthly distribution of wildfire-induced trippings of power transmission lines in China Southern Power Grid

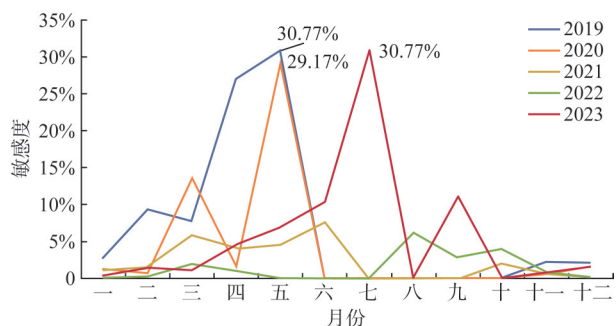


图6 南方电网山火跳闸敏感度月度分布

Fig. 6 Monthly distribution of wildfire tripping sensitivities in Chia Southern Power Grid

相比,山火告警事件在上午 08:00—09:00 存在一个相对明显的高峰,这使得该时段的山火跳闸敏感度极低,具体如图 8 所示。这可能是因为清晨是多数人开始农作的时间,此时用火量增加为山火发生提供了充足火源。但由于清晨水雾较重,火焰难以发展成大规模山火,对电网影响较小,因此该时段的山火跳闸敏感度较低。

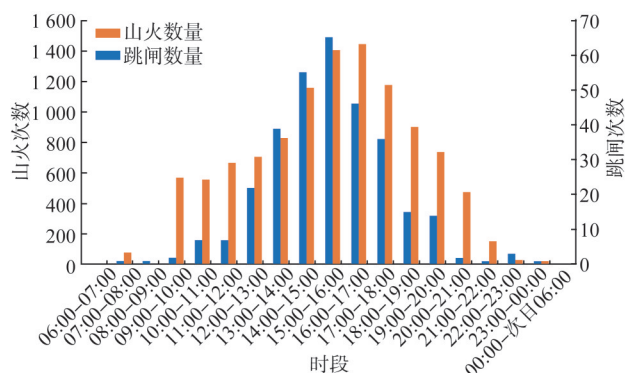


图7 南方电网输电线路因山火和跳闸时段分布

Fig. 7 Monthly distribution of power transmission line trippings due to wildfires in China Southern Power Grid

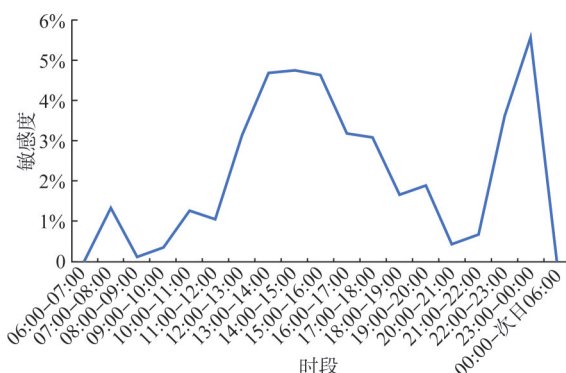


图8 南方电网输电线路山火跳闸敏感度分布

Fig. 8 Sensitivity distribution of wildfire-induced tripping in China Southern Power Grid's transmission lines

经过长时间日晒,地表植被含水量下降,可燃物易燃性显著提升。一旦出现火星,极易引发危及线路安全的大火。因此,下午 13:00—18:00 时段输电线路的山火跳闸敏感度较高。随着太阳西沉,山火发生数量逐渐减少,对应的山火跳闸数量也随之下降。不过对比山火告警数量与山火跳闸敏感度的变化趋势可以发现,两者虽有一定相似性,但并非完全一致。例如,山火告警数量与山火跳闸数量均在 15:00—16:00 达到峰值,而山火跳闸敏感度在 13:00—14:00 就已升至最高——此时通常是部分运维人员的午休时间,却已进入“一旦发生山火就易引发跳闸”的最危险阶段。另一方面,山火跳闸敏感度在夜间 22:00—00:00 出现明显的上升峰值,这是由于夜间相关运维部门对线路的监管力度不足,山火告警与扑救不及时所致。

基于山火跳闸敏感度的时段分布分析,建议电网管理部门可以适当加强部分高敏感度时段的监管

力度,提升输电走廊的山火自动化告警水平。

2 输电线路山火告警及跳闸空间分布

在对山火跳闸的时间分布特征进行详细统计分析后,本文进一步探讨其空间分布规律。首先,将南方五省(区)输电走廊的卫星火点监测数据,依据经纬度坐标匹配至对应栅格。随后,运用 Arcgis 软件的核密度分析工具计算火点密度,并绘制出南方电网火点密度空间分布图(见图9)。为清晰呈现火点密度与跳闸事件的空间关联,研究同时将该期间所有跳闸点的位置标注于地图之上。

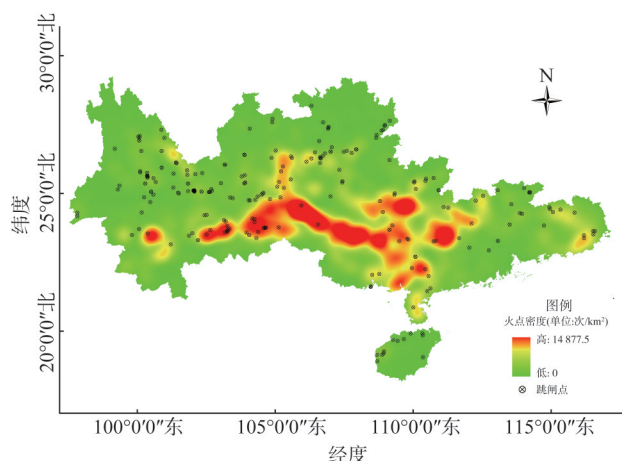


图9 南方电网火点密度分布

Fig. 9 Fire spot densities distribution in China Southern Power Grid

可以看出,云南东南部、广西中部和西部、广东西部是南方电网的山火高发区域。但近5年山火跳闸的空间分布与输电走廊山火事件存在显著差异,主要集中在云南和贵州两省的大部分地区,广西东部和广东西北部也有少量山火跳闸发生。输电线路山火跳闸是火焰高温、高电导以及燃烧产生的烟气颗粒物共同作用的结果,与自然环境中的多个变量密切相关。因此,本文在综合分析地理、植被、气象等影响因素与跳闸的空间关联性基础上结合火焰蔓延模型和击穿模型展开讨论。

2.1 山火跳闸影响因素空间分布及其敏感度分析

目前南方电网主要采用 Himawari-8 卫星和 GK-2A 两颗静止气象卫星,开展 24 h 无间断的山火监测与告警工作。然而,这两颗卫星在观测我国西部区域时,因仰角过大,定位准确度会显著下降。同时,受云贵高原特殊地貌的影响,山体遮挡使得云

南、贵州及广西的西部地区存在大量监测盲区(如图10所示)。统计数据显示,近5年因山火引发的308次跳闸事故中,有52次发生在监测盲区内——由于卫星未能及时发出告警,火焰持续燃烧最终导致输电线路跳闸。因此,建议在盲区内所有重要线路的杆塔上装设基于图像视频技术的山火监测装置,以避免因卫星盲区导致的漏告警现象。

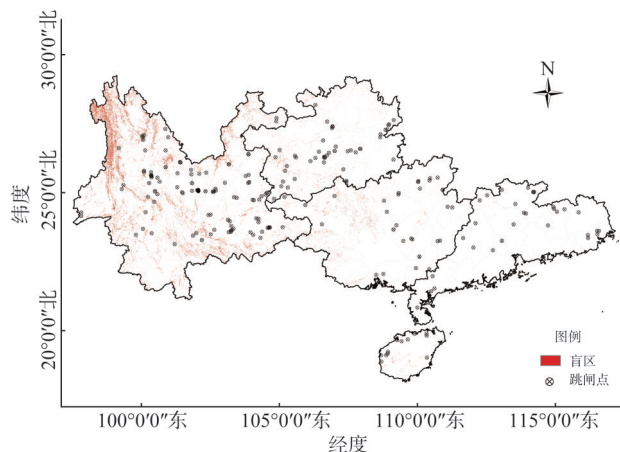


图10 南方电网监测盲区分布

Fig. 10 Distribution of monitoring blind spots in China Southern Power Grid

地形地貌会影响山火的蔓延过程,不同海拔高度能够改变火势的传播速度和方向,这一现象在山地和丘陵地带尤为显著^[9]。图11—12展示了南方电网区域内的海拔与坡度分布情况。从海拔来看,南方五省(区)的低海拔地区主要集中在广东、广西,而云南和贵州两省的大部分区域位于高海拔地带。云南的绝大部分区域以及贵州中部的山火跳闸点,均分布在海拔1 000 m以上的地区;广东与广西的北部丘陵山地地区,也存在较多山火跳闸点。从坡度角度分析,跳闸点主要集中在坡度较大的山区,尤其以20~30°坡度的区域最为突出。相比之下,广西的坡度较小,尽管当地输电走廊的山火告警次数较多,但最终引发跳闸的次数却相对较少。

结合表1山火跳闸敏感度的海拔分布统计可知,山火跳闸敏感度随海拔升高呈显著上升趋势。尽管0~0.5 km低海拔与1.5~3.5 km高海拔区段均出现了较高比例的山火告警及跳闸事件,但低海拔地区的跳闸敏感度仅为0.87%,8 009次告警中仅70次引发线路跳闸;而在面积广阔的云贵高原地区(1.5~3.5 km区域面积占比达29.31%),虽仅发生

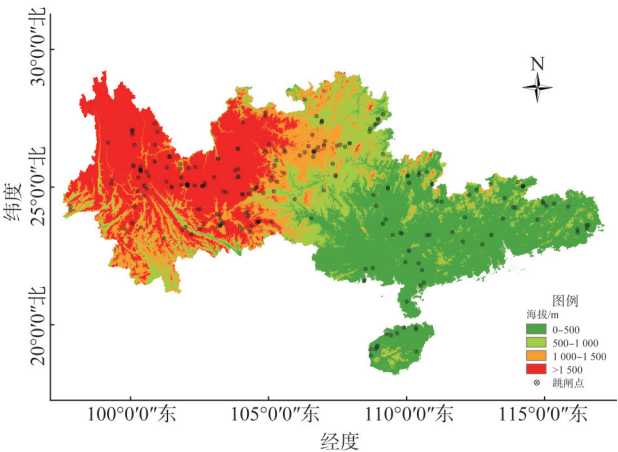


图 11 南方电网海拔分布

Fig. 11 Altitudes distribution in China Southern Power Grid

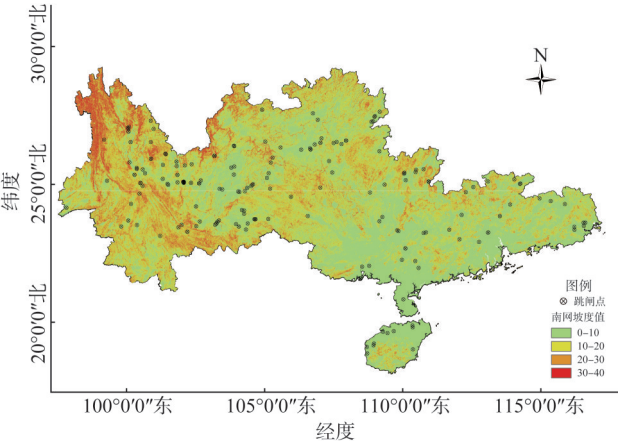


图 12 南方电网坡度分布

Fig. 12 Slopes distribution in China Southern Power Grid

2 001次山火告警，跳闸次数却达 148 次，对应跳闸敏感度为 7.40 %。这表明低海拔地区山火发生频次更高，但高海拔地区的云南电网与贵州电网面临更为严峻的山火防治压力——这些区域输电线路因山火跳闸后恢复供电能力有限，且线路维护与修复工作难度更大、成本更高。建议对高海拔地区的线路杆塔加装在线监测装置，并引入无人机巡线等措施，以提升高海拔地区电网的山火防治水平。

表 1 南方电网山火跳闸敏感度海拔分布统计
Tab. 1 Altitudes distribution statistics of wildfire-induced tripping sensitivity in China Southern Power Grid

海拔/km	面积比/%	告警数(比例/%)	跳闸数	敏感度/%
0~0.5	35.50	8 009(60.44)	70	0.87
0.5~1.0	18.28	1 757(13.25)	33	1.88
1.0~1.5	16.91	1 484(11.20)	57	3.84
>1.5	29.31	2 001(15.10)	148	7.40

山火跳闸敏感度随坡度增加呈现先升后降的趋势，如表 2 所示，在坡度 20 °~30 °时达到最高值 8.58 %；当山火发生在坡度超过 30 °的陡坡上时线路的山火跳闸敏感度下降至 3.04 %。这可能与坡度对山火热传播过程的影响有关：通常坡度越大山火蔓延与发展速度越快，但当地形极为陡峭时火焰会进入附壁燃烧状态，燃烧速度反而降低，因此 30 °以上区间的山火跳闸敏感度出现下降^[10]。基于此，电网在日常山火运维防控中应优先控制跨越山丘的输电杆塔周边的植被高度，以避免相关输电线路因山火引发跳闸。

表 2 南方电网山火跳闸敏感度坡度分布统计
Tab. 2 Slopes distribution statistics of wildfire-induced tripping sensitivity in China Southern Power Grid

坡度/(°)	面积比/%	告警数(比例/%)	跳闸数	敏感度/%
0~10	62.53	10 098(72.22)	139	1.68
10~20	21.10	3 157(22.58 %)	115	2.91
20~30	11.59	431(3.08)	93	8.58
30~40	4.78	296(2.12)	17	3.04

植被类型会影响火焰燃烧特性，进而对输电线路山火跳闸产生影响。南方电网植被分布如图 13 所示，山火跳闸的多发植被类型为栽培植被和针叶林。从表 3 可见，除草丛类型的山火告警次数占比远高于其在区域内的面积占比外，其他各类植被的山火告警占比基本与面积占比保持一致。值得注意的是，草丛的山火跳闸敏感度也超过平均值（1.84 %），因此当输电走廊下垫面为草丛时，仍需警惕其火灾跳闸风险，日常需加强草原火灾的运维防控。另一方面，栽培植被的山火告警数和跳闸数均为所有植被类型中最高，且其山火跳闸敏感度达 2.35 %。甘蔗、玉米及各类油料植物是华南和西南地区的重要经济作物，这些农作物收割后纤维丰富，极易被点燃，而当地农民习惯通过“烧蔗叶”等方式清理田地，准备新一轮耕种。一旦起火，极易引发线路跳闸，需在春耕、秋收时节加强此类山火的防控宣传与管理。在所有植被类型中，针叶林的山火跳闸敏感度最高，山火监测告警时需特别关注。

典型的气象影响因素包含了气温、风速和相对湿度。考虑到气象随着时间和区域变化较大，因此选择了近 5 年的山火高发期的月平均气象，以分析

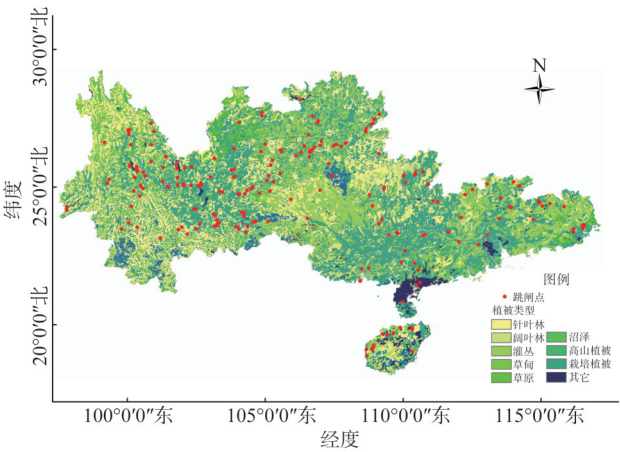


图 13 南方电网植被类型分布

Fig. 13 Vegetation types distribution in China Southern Power Grid

表 3 南方电网植被类型山火跳闸敏感度分布统计

Tab. 3 Vegetation type wildfire tripping sensitivity distribution statistics in China Southern Power Grid

植被	面积比/%	告警数(比例/%)	跳闸数	敏感度/%
草丛	16.64	3 422(24.57)	63	1.84
灌丛	29.49	2 785(20.00)	56	2.01
阔叶林	7.48	506(3.63)	4	0.79
针叶林	18.27	2 584(18.56)	76	2.94
栽培植被	28.12	4 629(33.24)	109	2.35

南方电网山火告警和跳闸的空间分布情况, 如图 14—16 所示。

在山火高发期, 气温由南向北逐渐降低, 相对湿度整体呈现“西北低、东南高”“内陆低、沿海高”的分布特征。风速分布与地形及季风现象相关, 高

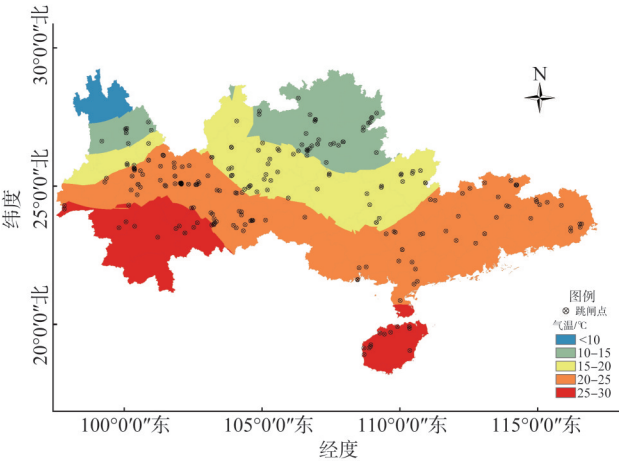


图 14 南方电网山火高发期月均气温分布

Fig. 14 Monthly average temperatures distribution during high-risk wildfire periods in China Southern Power Grid

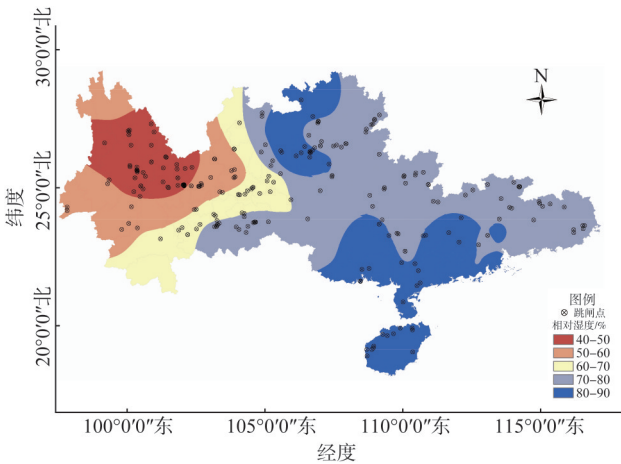


图 15 南方电网山火高发期月均空气相对湿度分布

Fig. 15 Monthly average relative humidities distribution during high-risk wildfire periods in China Southern Power Grid

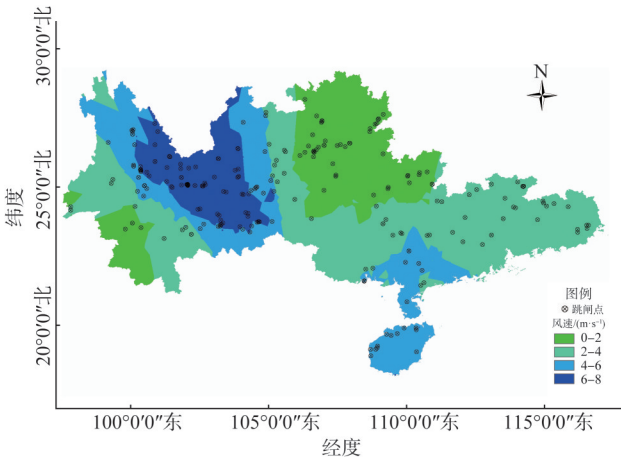


图 16 南方电网山火高发期月均风速分布

Fig. 16 Monthly average wind speeds distribution during high-risk wildfire periods in the Southern Power Grid

风速区域集中于云南地区。南方五省(区)的山火跳闸多发生在气温较高、湿度较低且风速较大的云南省, 该地区干旱的气候条件更易引发山火并形成大规模火势, 从而增加了输电线路跳闸的概率。

为进一步阐明气象条件与山火告警及跳闸之间的关联, 本文收集了各次山火告警和山火跳闸当日的平均气温、相对湿度与风速数据, 并计算出对应的跳闸敏感度, 具体结果如表 4—6 所示。

近 5 年南方电网辖区内山火告警发生时的气温多集中于 10~25 °C, 这主要受地区气候影响。南方五省常年平均气温高于北方, 多数处于 10~25 °C 区间。山火跳闸敏感度随日平均温度升高呈逐渐上升趋势, 在 25~30 °C 范围内, 跳闸敏感度达 12.74 %。

表 4 南方电网山火跳闸敏感度温度统计

Tab. 4 Temperatures statistics of wildfire tripping sensitivities in

China Southern Power Grid

气温/℃	告警次数	跳闸次数	敏感度/%
<10	761	10	1.31
10~15	3 957	31	0.78
15~20	3 962	80	2.02
20~25	4 512	94	2.08
25~30	730	93	12.74

表 5 南方电网山火跳闸敏感度空气相对湿度统计

Tab. 5 Relative humidities statistics of wildfire tripping

sensitivities in China Southern Power Grid

空气相对湿度/%	告警次数	跳闸次数	敏感度/%
40~50	738	90	12.20
50~60	1 658	94	5.67
60~70	4 559	41	0.90
70~80	5 352	62	1.16
80~90	1 615	21	1.30

另一方面,南方五省(区)常年高温高湿,山火告警时的相对湿度多集中在 60 %~80 %;当相对湿度超过 80 %时,山火告警次数显著减少。与山火告警不同,山火跳闸时的相对湿度在 40 %~60 %区间占比最高,导致跳闸敏感度随湿度降低而明显增加。因此,高温干旱环境是输电线路山火跳闸的重要环境条件。电网需加强与气象部门的合作,建立中长期气象预报机制,对极端干旱条件进行预警,防止山火群发引发多线路同时跳闸导致的电网故障。

表 6 南方电网山火跳闸敏感度风速统计

Tab. 6 Wind speeds statistics of wildfire tripping sensitivities in

the Southern Power Grid

风速/(m·s ⁻¹)	告警次数	跳闸次数	敏感度/%
0~2	6 121	71	1.16
2~4	7 171	186	2.59
4~6	548	41	7.48
6~8	82	10	12.20

在风速分布中,低风速条件下(0~4 m/s)输电走廊山火告警占比很大,这可能是由于无风或者低风条件下火焰不容易被风吹灭,更容易产生火灾所导致。而输电线路跳闸时的风速主要集中在 2~4 m/s。但是从山火跳闸敏感度来看,风速越高,山火引发的线路跳闸的概率更高。

2.2 基于山火跳闸模型的因素趋势分析

输电线路山火跳闸本质上是由山火火焰等离子体的高导电性,以及火焰燃烧产生的高温与烟气共同作用,导致空气间隙放电击穿所引起的。国内外针对这一现象开展了大量试验研究,已总结出一定的试验规律^[11-13]。根据 Fonseca 针对典型植被——木垛火的长间隙击穿试验结果,火焰的平均击穿场强约为 $E_f=35 \text{ kV/m}$ ^[14]。文献[15]进一步将火焰划分为火焰连续区、火焰不连续区和烟雾区 3 个区间,通过试验数据拟合得出了各区间的击穿场强,以此解释不同火焰高度下线路的击穿电压。其中,火焰连续区的击穿场强为 64.6 kV/m,火焰不连续区为 75.4 kV/m,烟雾区则为 186.4 kV/m。不难看出,火焰区的绝缘强度远低于其上方的烟雾区。因此,当输电线路下方发生山火时,线路的剩余绝缘水平与火焰的燃烧强度及高度密切相关。

以我国泛用性最强的王正非火焰燃烧模型为例,下垫面发生山火时,其火焰高度 H_f 近似可表达为:

$$H_f = \sqrt{qWK_vK_\varphi R_0/250} \quad (1)$$

$$K_v = e^{0.178v} \quad (2)$$

$$K_\varphi = e^{3.533\tan\varphi^{1.2}} \quad (3)$$

$$R_0 = 0.03T + 0.05F - 0.01H + 0.7 \quad (4)$$

式中: q 为可燃物燃烧热值,与植被类型有关; W 为下垫面的可燃物载量; R_0 为风平面上的山火蔓延速度; K_v 和 K_φ 分别为相应风速 v 修正系数和坡度 φ 修正系数; T 、 F 和 H 分别为发生山火时的环境温度、风级和相对湿度。在此基础上,文献[15]结合了火焰燃烧模型对输电线路跳闸风险进行了差异化评估。根据火焰高度与线路导线高度的关系,将火焰条件输电线路的绝缘间隙分为部分桥接和完全桥接两种不同状态,分别给出了两种山火状态下的输电线路山火击穿电压评估方法,如图 17 所示。

根据上述分析,山火燃烧时火焰高度越高,线路的绝缘强度降低越严重,对应就越容易发生山火跳闸。火焰燃烧模型中火焰高度按照式(3)进行坡度修正,即随着坡度增加,火焰的蔓延速度和燃烧高度呈指数增加。然而,山火跳闸敏感度指出当坡度达到 30°以上时山火引发的跳闸的概率反而下降。这可能是因为在上坡火蔓延过程中,随着坡度的增加火焰倾斜角越来越小。在无风条件下火焰倾

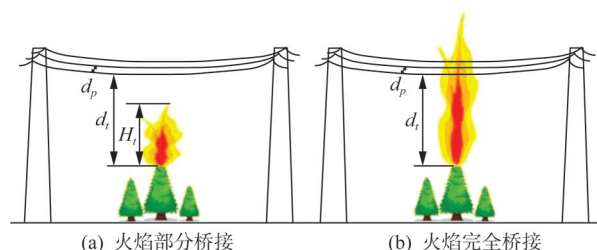


图17 基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险评估场景分类

Fig. 17 Classification of wildfire tripping risk assessment scenarios for transmission lines based on flame combustion model

斜角 γ 与坡度角 α 的经验关系式为^[16]:

$$\gamma = 90^\circ - 2\alpha \quad (5)$$

在现实情况有风的条件下 30° 以上基本出现了附壁燃烧的状态。此时火焰的脉动性减弱,对前方未燃燃料的直接接触加热减少,并且在火焰卷吸行为的影响下导致火焰的蔓延速度以及燃烧高度的降低^[17]。因此同样其他条件下山火桥接间隙引发线路跳闸的概率降低。

在地形影响因素中海拔的作用更为复杂。高海拔地区的压强与空气密度均低于低海拔地区,空气中电子的自由程更大,相应的空气绝缘水平也更低。国际电工委员会(IEC)及国家标准也针对海拔对空气放电电压的影响提出了相应的修正方法^[17]。此外,研究团队前期分别在海拔23 m和2 013 m的地区开展山火击穿试验研究^[9],发现高海拔地区火焰环境下,间隙的预放电电压更低,产生电弧所需的电流更小,且更易发生二次建弧现象。同时,高海拔地区含氧率较低,植被不充分燃烧时会产生更多带电颗粒,这些颗粒物在高海拔条件下对电场的畸变作用以及对空气绝缘性能的影响程度,也比低海拔地区更为严重。

植被类型对输电线路山火敏感度的影响可以通过可燃物以及放电电压两个角度来解释。表7为各植被类型可燃物燃烧热值 q 参考取值范围^[18]。针叶林的 q 值较高,燃烧时引起的火焰高度更高。且根据《全国森林火险区域等级》对植被类型的燃烧等级划分,阔叶林属于可燃类,松树、桉树等针叶林属于易燃类^[19]。针叶林的易燃性主要发生的树冠火,火焰较高、蔓延迅速,对输电线路的影响最为严重。而阔叶林一般发生地表火^[14],难以形成高火焰、浓烟尘的树冠火,因此其对山火跳闸敏感度相

对较低。

表7 典型植被的可燃物燃烧热值

Tab. 7 Combustion heat value of typical vegetation

植被类型	草地	灌丛	阔叶林	针叶林	混交林
q 值/(kJ·kg ⁻¹)	15 000	16 000	17 830	19 620	18 720

对于栽培植被、灌丛和草丛,虽然其生长高度较矮,但是燃烧时产生的火焰通常更为猛烈,并且燃烧产生的灰烬也会更多,导致植被火间隙的温度、电导率和烟雾颗粒对放电电压的影响较大。这一点在甘蔗玉米以及油料作物这类含糖含油的栽培植物尤为明显。因此这些植被类型的山火跳闸敏感度也不低。

气象条件中,温度越高、湿度越低、风速越大,其线路的山火跳闸敏感度越低。从火焰燃烧模型中不难看出,火焰的初始蔓延速度与温度、风速呈正相关,与相对湿度呈负相关,且实际蔓延速度需根据风速进行指数修正。随着温度升高植被含水量降低、干燥程度加剧,可燃性随之提升;风速增大则为山火提供了更充足的氧气供应,在高温与强风的共同作用下,火线强度与火焰蔓延速度急剧上升,火焰高度也显著增加,进而提高了线路跳闸的风险。低湿度会进一步降低植被含水率,使燃烧更剧烈,导致线路间隙场强下降。当相对湿度高于70%时山火跳闸敏感度略有回升,这可能是因为在高湿度环境下植被燃烧不充分,产生大量浓烟及大尺度灰烬,这些高浓度烟气颗粒易相互连接,严重畸变电场,诱发放电击穿——此时烟雾成为引发线路山火跳闸的主要因素^[20]。

3 结论

根据近5年南方电网架空输电线路山火事故及山火跳闸数据,本文分析了输电走廊山火告警与输电线路跳闸的时空分布规律,重点探讨了输电线路山火跳闸敏感度的时空分布特征,并为电网公司相关监控与运维部门提出建议。同时,结合基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸模型,剖析了输电线路山火跳闸敏感度变化趋势背后的物理机制。本文所得结论及建议如下。

1)近年来,受极端气候影响,输电走廊附近的山火事件显著增多。不过,得益于电网监测手段的不断完善以及运维部门对山火防治工作的高度重

视,山火引发的跳闸敏感度基本呈逐年下降趋势。电网需进一步加强与林业、消防、气象等部门的协同合作,从源头上减少山火事件的发生,以提升对山火的主动防御能力。

2)每年3—5月以及每日13:00—18:00的山火高发期内线路的山火跳闸敏感度仍然较高,需重点防范,进一步提升山火跳闸高风险时段的应急处置效率,夜间也不可放松警惕。在春节、清明等节假日期间须对可能引发山火的人为行为进行劝阻,避免人为火源引发山火。

3)输电线路山火跳闸敏感度随海拔高度升高而增加。在地形复杂的山区,输电走廊坡度处于 20° ~ 30° 、地表覆盖针叶林及人工栽培植被的线路区段,是山火跳闸风险最高的区域。建议针对这些区域加强日常运维频次,提前开展植被改造工作,通过控制树木高度与可燃物含量,降低电网山火跳闸风险。此外,对于云贵地区高海拔、坡度起伏较大的区域,建议通过在杆塔上装设在线监测装置、增加无人机巡线等措施,避免因卫星监测盲区导致的漏告警问题。

4)高温、低湿度、高风速为山火的蔓延与发展提供了有利的环境条件。火焰更易击穿线路的绝缘间隙,引发线路短路跳闸。电网需加强与气象部门的合作,建立中长期气象预报机制,对极端干旱条件进行预判,以防范山火群发导致多线路同时跳闸引发的电网故障。

参考文献

- [1] 谢从珍,周晓静,余松,等.基于先验知识与孪生网络监督的输电线路山火跳闸预测模型[J].电力系统保护与控制,2025,53(21):72-83.
XIE Congzhen, ZHOU Xiaojing, YU Song, et al. Wildfire-induced transmission line trip prediction model based on prior knowledge and Siamese network supervision [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(21): 72-83.
- [2] 胡秦然,丁昊晖,陈心宜,等.美国加州2020年轮流停电事故分析及其对中国电网的启示[J].电力系统自动化,2020,44(24):11-18.
HU Qinran, DING Haohui, CHEN Xinyi, et al. Analysis of the 2020 rotating blackout in California, USA, and its implications for China's power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 11-18.
- [3] 蔡奇均,曾爱聪,苏漳文,等.基于Logistic回归模型的浙江省林火发生驱动因子分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(2):102-109.
CAI Qijun, ZENG Aicong, SU Zhangwen, et al. Analysis of driving factors of forest fire occurrence in Zhejiang Province based on logistic regression model [J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University, 2020, 48(2): 102-109.
- [4] SPESSA A, MCBETH B, PRENTICE C. Relationships among fire frequency, rainfall and vegetation patterns in the wet-dry tropics of northern Australia: an analysis based on NOAA-AVHRR data [J]. Global Ecology and Biogeography, 2005, 14(5): 439-454.
- [5] 秦圣辉,尤飞,王振华,等.山火诱发500 kV及以上输电线路跳闸事故分析[J].消防科学与技术,2017,36(5):712-716.
QIN Shenghui, YOU Fei, WANG Zhenhua, et al. Analysis of tripping accident of 500 kV and above transmission line induced by hill fire [J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(5): 712-716.
- [6] 周恩泽,龚博,刘淑琴,等.南方电网架空线路因山火跳闸故障统计分析[J].广东电力,2022,35(4):80-86.
ZHOU Enze, GONG Bo, LIU Shuqin, et al. Statistical analysis of tripping faults of overhead lines of Southern Power Grid due to hill fire [J]. Guangdong Power, 2022, 35(4): 80-86.
- [7] 集清尘.2022年度气候总结[EB/OL].(2023-03-24)
<https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknt/qxbg>.
- [8] 刘淑琴,卢骏哈,周恩泽,等.架空输电线路精细化山火监测告警技术[J].广东电力,2022,35(6):99-106.
LIU Shuqin, LU Junhan, ZHOU Enze, et al. Refined hill fire monitoring and warning technology for overhead transmission lines [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(6): 99-106.
- [9] 周恩泽,樊灵孟,黄道春,等.2013 m海拔高度植被火条件下导线-板间隙击穿特性[J].高电压技术,2022,48(11):4316-4322.
ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Daochun, et al. Breakdown characteristics of conductor-plane gap under-vegetation fire at the altitude of 2013 m [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4316-4322.
- [10] 武金模.外界风和坡度条件下地表火蔓延的实验和模型研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.
- [11] 卢威.模拟高风险植被火焰条件下间隙击穿特性试验研究[D].武汉:武汉大学,2019.
- [12] 黎鹏,阮江军,黄道春,等.模拟山火条件下导线-板间隙击穿特性影响因素分析[J].电工技术学报,2018,33(1):195-201.
LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Analysis of factors affecting the breakdown characteristics of conductor-plate gap under simulated hill fire conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 195-201.
- [13] 周恩泽,饶章权,刘琦,等.典型高风险植被火条件下导线-板间隙击穿特性[J].高压电器,2024,60(3):179-185.
ZHOU Enze, RAO Zhangquan, LIU Qi, et al. Breakdown characteristics of wire-to-plate gap under typical high-risk vegetation fire conditions [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 179-185.
- [14] 周恩泽,樊灵孟,黄勇,等.基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估[J].电网技术,2022,46(7):2778-2785.
ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Yong, et al. Assessment of tripping risk distribution of transmission line hill fire based on flame burning model [J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2778-2785.

(下转第73页 Continued on Page 73)