

森林雷击火发生规律研究*

冯俊伟, 沈浩, 梁栋

中山大学智能工程学院/广东省消防科学技术重点实验室, 广东 广州 510006

摘要: 雷击是森林火灾的重要点火源。文章研究了雷击的位置与地表可燃物的关系, 采用冲击电压发生器测量了三种典型针叶床的击穿电压值。结果表明: 新疆云杉针燃料床和西伯利亚松针燃料床的击穿电压值差别不大, 马尾松针燃料床击穿电压最低。另外, 研究了不同含灰率对泥土电阻率的影响, 结果表明: 含灰率越大, 电阻率越低, 经过人工烧除后的迹地更容易遭受雷击。采用冲击电流发生器来模拟雷击过程, 并结合 Taylor 的假设探究了森林雷击火的形成过程。最后, 比较了典型植被结构中树木和草的雷击临界着火特性, 发现草比木片更容易被雷电引燃。

关键词: 雷击火; 人工烧除; 击穿电压; 冲击电流

中图分类号: S762.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 03-0131-07

Study on the occurrence law of forest lightning fire

FENG Junwei, SHEN Hao, LIANG Dong

School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fire Science and Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract: Lightning strike is an important ignition source of forest fires. As the global warming, forest lightning fire is becoming more and more serious. In this paper, the relationship between the position of lightning strike and ground combustible matter was studied, and the breakdown voltages of three typical conifer beds were measured by the impulse voltage generator. The results show that there is little difference in the breakdown voltage between Xinjiang spruce needle bed and Siberian pine needle bed. The breakdown voltage of Pinus massoniana Lamb. needle bed is the smallest. In addition, the effect of ash content on the resistance of soil was studied. The results show that the higher the ash content is, the lower the resistance is. The site after prescribed burning is more vulnerable to lightning strike. The impulse current generator was used to simulate the lightning strike process, and it is found that the combustible matter can be ignited and produce mars splashing under the action of impulse current. Combined with the hypothesis of Taylor, the formation process of forest lightning fire was discussed. Finally, the lightning critical ignition characteristics of typical vegetation structure (tree and grass) were compared, and it is found that the grass is more likely to be ignited by lightning than the wood chip.

Key words: lightning fire; prescribed burning; breakdown voltage; impulse current

雷击是引起森林火灾的重要起因, 它作为天然火源, 是一种难以控制的自然现象, 并且形成机理复杂。另外, 雷击火通常发生在一些偏远的深山密林, 与人为火相比, 雷击火的预防与扑救

* 收稿日期: 2019-11-06 录用日期: 2020-02-03 网络首发日期: 2020-11-10

基金项目: 广东省科技计划项目 (2014B030301034)

作者简介: 冯俊伟 (1992年生), 男; 研究方向: 阴燃火灾; E-mail: fjwei@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 梁栋 (1956年生), 男; 研究方向: 煤炭阴燃火灾; E-mail: liangd3@mail.sysu.edu.cn

难度要大,容易形成大面积的森林火灾,危及生态环境和人类安全。我国的雷击火在大兴安岭和新疆阿尔泰山最为严重,约占地区森林火灾总数的38%和18%^[1]。随着全球气候变暖,森林雷击火也有增加的趋势^[2]。2019年3月30日的木里森林雷击火造成31名消防员牺牲^[3]。雷击火在世界范围内也有分布,美国、加拿大、俄罗斯和芬兰等国有严重的雷击火^[4-5]。1976-2001年,雷击火占加拿大安大略省森林火灾总数的43%^[6];1980-2004年,雷击火占美国阿拉斯加州森林火灾总数的52%^[7]。

雷击火与地理因素有关,雷击的位置对环境有选择性。经验表明,沼泽地、草塘等是雷击的高发区^[1,8],电阻率低的泥土容易被雷电击中^[9-10]。一些文献研究了泥土中的水含量和无机盐含量对电阻率的影响,其中研究较多的盐是硫酸钠和氯化钠,普遍的规律是含水量和无机盐含量的增加会使电阻率下降^[11-13]。而植物灰烬的成分是炭和无机盐,很少研究会考虑植物灰对泥土电阻率的影响,然而植物灰在人工烧除后的迹地中很常见,这些迹地对雷击的选择性将会有影响。另外,位于地表的可燃物也会影响雷击位置。所以,我们有必要研究人工烧除迹地的雷击选择性。

雷击火形成机理复杂,以往很多研究采用火灾发生后的统计结果来发掘雷击火的规律。彭欢采用Logistic模型研究大兴安岭的雷击火,并对模型参数进行了修正^[14]。孙瑜采用Maxent模型预测雷击火火险,发现日降雨量、云地闪电数量及云地闪回击电流强度是影响森林雷击火发生的3个最重要因素^[15]。郭福涛使用K-函数对大兴岭地区雷击火分布格局的研究中发现,该地区雷击火呈聚集分布并存在“热点区域”^[16]。高永刚等建立了大兴安岭地区雷击火综合指标模型,并将雷击火险划分为4个预报等级^[17]。国外学者也使用了大量历史数据统计分析雷击火规律,其中使用较多的是Logistic模型。Hartford使用Logistic模型对雷击火阴燃阶段的概率进行了预测^[18]。Nieto等建立了西班牙地区的雷击火Logistic预测模型,发现雷暴次数是最显著因子^[19]。也有部分学者使用K-函数研究雷击火规律,如Podur等使用K-函数分析加拿大安大略地区的雷击火,发现:部分尺度的雷击火呈聚集分布,这种分布与雷暴和干旱的关系明显^[20]。除此之外,也有学者通过人工模拟闪电来研究雷击火。Latham和朱易等均开展了人工模拟

雷击火的研究,他们通过改变燃料床种类和含水率,得到不同可燃物在不同含水率下的雷击着火概率模型^[21-22]。Darveniza使用冲击电流发生器模拟雷击火,发现冲击电流不仅有加热作用,还有很大的机械破坏效应^[23]。综上所述,通过雷击火灾发生后的结果总结得到的模型能较好地预测某一特定区域的规律,但它并不能观察雷击火发生的实时过程,从而很难解释雷击火的形成机理。而人工模拟闪电可以为研究雷击火提供很大帮助,有助于观察雷击火形成过程和定量分析各影响因素,并且人工模拟闪电的实验时间比长年累月的数据统计要短。但人工模拟雷击火的规律具有一定局限性,它不能综合考虑实际自然环境的各种因素,在应用时还需与实际情况相结合。

Fuquay对蒙大拿地区发生的雷击火进行了观测研究。在对引起雷击火的云地闪特征数据进行分析后,发现:这些云地闪放电过程中均伴随长时间连续电流,这些长时间连续电流放电时间超过40 ms。此后,Fuquay等将LCC作为能够引发雷击火云地闪的重要判定依据。这一理论得到大部分学者的认同,并应用于美国国家火险等级系统的雷击火险预测模块。此后,长时间持续电流成为雷击火研究领域的重要研究对象^[24]。Latham和朱易等均开展的是长时间持续电流对可燃物的点火概率实验。但是,根据SAE ARP 5412 2005的标准,雷电实际电流波形是由冲击电流波和长时间连续电流等组成的^[25],冲击电流的峰值可以达到200 kA,但持续时间只有500 μ s,而长时间连续电流的幅值在200~800 A,持续时间可达1 s。冲击电流在整个电流中占的比例很大,需要充分考虑冲击电流和长时间连续电流的共同作用。

本文将研究植物含灰率对泥土电阻率的影响,通过冲击电压发生器测量不同地表可燃物的击穿电压,进而探讨人工烧除迹地后的雷击选择性。另外,通过冲击电流发生器来模拟闪电点燃植物的过程,发现冲击电流的点火规律。

1 实验方法

1.1 材料制备

新疆额尔齐斯河和内蒙古呼伦贝尔草原是中国雷击火高发区。实验所用的泥土采自新疆额尔齐斯河畔的一块天然泥土地。经考察,该泥土并没有烧过的灰烬痕迹,实验前去除泥土中的根须等杂质。所用针叶分别是新疆云杉针,西伯利亚

松针和马尾松针, 采样时从地表干枯针叶中选取。草样和木料采自呼伦贝尔草原, 分别是糙隐子草和樟子松木, 采样时从草原上采割新鲜的活糙隐子草, 从活树干上截取一部分樟子松树枝。材料经过 105°C 烘箱烘干后使用。

含植物灰的泥土制备方法: 烘干的泥土通过研磨后, 用 50 目的滤筛过滤; 把烘干的马尾松针放入燃烧池燃烧后, 获得的灰烬研磨并通过 50 目的滤筛过滤。最后把泥土, 水和灰烬混合, 通过改变加入的灰烬重量来制备不同含灰率的土样。

1.2 实验设备

采用冲击电压发生器测量地表可燃物的击穿电压, 冲击电压发生器依据 Marx 回路原理设计。Marx 回路原理简单说就是利用电容器并联充电, 然后串联放电而产生高压, 通过调节电阻、电容以及放电间隙等参数来调整输出电压的波形。冲击电压发生器广泛地应用于雷电过电压耐受性能试验^[26-27]。参照文献测试绝缘油击穿电压所用的波形^[28], 本实验所用的冲击电压波形为 1.2/50 μs。

泥土电阻率采用试样盒测量, 试样盒用亚克力板制成, 尺寸为 10 cm×5 cm×1 cm, 盒两端接铜电极, 最后电极处接上电阻表来测量泥土的电阻。泥土电阻率通过电阻率公式 $\rho=RS/L$ 计算。其中, ρ 为电阻率, $\Omega \cdot m$; R 为电阻, Ω ; S 为横截面积, m^2 ; L 为长度, m 。

雷击着火模拟实验在冲击电流发生器上进行, 如图 1 所示。它可以产生 8/20 μs 冲击电流波形, 即波前时间 8 μs, 半波时间 20 μs。最大电流峰值 (I_p) 达到 100 kA。冲击电流发生器是模拟产生冲击大电流的实验装置, 冲击电流发生器同样基于大容量电容器长时间充电, 然后促发球隙击穿, 并联的对待测试样短时间放电, 使得待测设备有冲击大电流通过, 产生电热效应^[29]。充电回路主要由高压变压器, 整流硅堆, 保护电阻, 电容组成; 放电回路由电容, 球间隙, 电阻和燃料床组成。当加载样品后, 由于样品的电阻电感, 实际的输出波形会有一定变化。本实验采用针-板放电结构, 罗斯线圈测量流过可燃物的电流, 分压器测量可燃物两端电压, 可燃物放置于板电极上, 其结构如图 2 所示。加载样品后, 测量得到的典型电压电流曲线如图 3 所示。部分文献也采用冲击电流发生器来模拟闪电对碳纤维复合板的破坏作用^[30-31]。人工模拟闪电和自然雷击必然有一定差别, 人工闪电的结果并不能完全代表自然界闪电,

但是通过人工闪电得到的结论具有一定的启发意义。



图1 冲击电流发生器外观图
Fig. 1 Impulse current generator

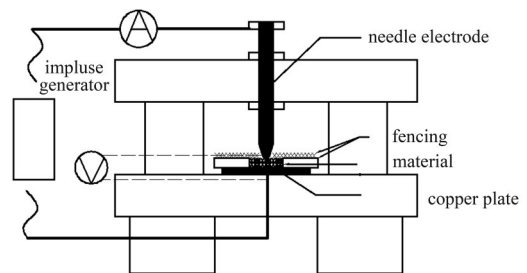


图2 雷击点火装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of lightning ignition device

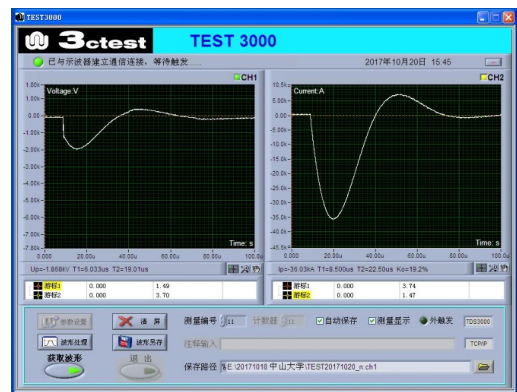


图3 典型的电压电流曲线
Fig. 3 The typical voltage and current curves

1.3 实验步骤

测量不同地表可燃物的击穿电压步骤是: 逐步升高冲击电压的峰值, 直到电压能击穿地表可燃物为止, 如果该电压值能重复击穿植被 4 次, 则记录该值作为击穿电压值。重复上述步骤 4 次, 得到 4 个击穿电压值, 并对 4 个值求平均和标准偏差。

测量土样电阻率的步骤: 把泥土样本装入试样盒后, 接上电阻表测量、重复测量, 求取平均

值和标准偏差。

测量可燃物的雷击着火临界电流的步骤是：保持冲击电流波形为 $8/20 \mu\text{s}$ 不变，逐步升高冲击电流的峰值，直到可燃物刚好能着火为止，记录输出的电流、电压波形，此时的电流即为着火临界电流。重复测量，求取平均值。

2 结果与分析

2.1 不同地表可燃物的击穿电压

地表可燃物是由可燃物和空气组成的燃料床，是典型的两相体。两相体空间的电场分布情况非常复杂，非气相物质颗粒的存在使得两相体中的局部电场发生畸变，畸变程度与非气相物质颗粒自身参数和分布情况相关^[32]。可燃物和空气在常压下都是良好的绝缘体，当施加高压电后，燃料床被击穿，电流通过燃料床并加热点燃可燃物。

实验测量了森林地表三种常见松针燃料床的击穿电压值，结果如图 4 所示。在燃料床堆积密度、含水率和厚度相同情况下（燃料床的堆积密度为 0.15625 g/cm^3 ，含水率 0% ，厚度 1 mm ），从平均击穿电压值的角度看，新疆云杉针燃料床比西伯利亚松针燃料床更容易击穿，绝缘性稍差，但两者差别不大，而马尾松针燃料床在三者之中击穿电压最低，绝缘性最差。在自然界雷电高电压下，由于地表可燃物燃料床的厚度占空中到地面的整个雷电通道的长度有限，因此燃料床类型的不同对雷击选择性影响可能有限。另外，空气的击穿电压约为 3 kV/mm ，三种燃料床的击穿电压都要比空气大，绝缘性能较空气好。

2.2 含灰率对泥土电阻率的影响

泥土的含灰率与电阻率关系如图 5 所示（土样

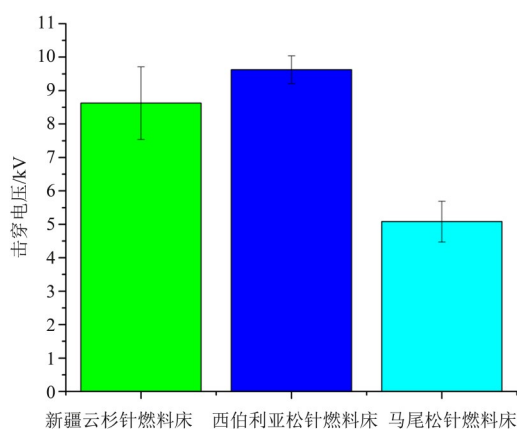


图 4 三种松针燃料床的击穿电压值

Fig. 4 Breakdown voltage of three kinds of pine needle bed

的堆积密度和含水率分别为 1.2 g/cm^3 和 33.3% ）。对泥土含灰率与电阻率的关系进行拟合，得

$$\rho = 34 + 8 \times 0.84^\varphi, \quad (1)$$

其中 ρ 为电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； φ 为含灰率，%。并求得 $R\text{-Square} = 0.97$ 。

影响土壤电阻率的因素很多，主要有三类：第一类是与土壤结构有关的因素，包含孔隙率、含水量和土壤结构；第二类是表征土壤颗粒特征的因素，包含土壤颗粒形状与方位、土壤颗粒粒度分布、离子交换能力与润湿性等；第三类是与土壤溶液有关的因素，它随着土壤外界环境条件的变化而改变，主要有孔隙水电阻率、孔隙水中离子组成与外界温度等。这三类因素对土壤电阻率的影响并不是独立的，而是相互影响、相互作用的^[33]。随着泥土中含灰率的增加，电阻率减少。这是由于植物灰中含有大量碳，具有良好的导电性；另外植物灰中含有无机盐，无机盐溶解在土壤溶液中使离子浓度增加，进而减少泥土的电阻率。

可燃物是火灾燃烧的物质基础，枯死的杂草松针极易引起火灾。计划烧除方式可人为干预减少可燃物载量，改变可燃物立体结构，切断可燃物的连续分布，达到预防、减少高强度火灾的目的^[34]。但由于雷击通常会选择电阻率低的泥土，所以经过人工烧除后的迹地，会由于泥土中含有大量植物灰而更容易遭受雷击。

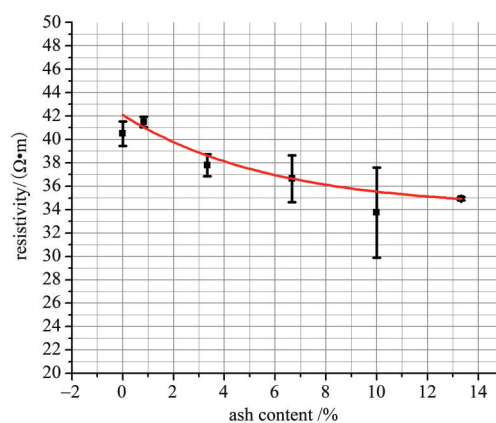


图 5 含灰率与电阻率的关系

Fig. 5 Relationship between ash content and resistivity

2.3 模拟闪电下的雷击着火

采用冲击电流发生器可以模拟得到雷击的可燃物着火过程。放电后可燃物的着火现象如图 6 所示。冲击电流放电时，产生强烈的白光和轰鸣。可燃物在焦耳热的加热作用下被点燃，产生火星、

火苗。冲击电流同时产生强烈的冲击破坏效应, 使着火的火星飞溅散开, 部分火星在飞溅过程中与空气换热而熄灭, 部分火星能够维持一段时间的持续燃烧。放电结束后, 用CO浓度仪能够检测到CO, 表明过程中存在不完全燃烧。熄灭的火星有部分未燃烧完全, 形成黑炭, 部分形成白色灰烬。Anderson认为长时间持续电流加热可燃物至着火的判断依据是: 可燃物出现持续3 min以上的阴燃^[35]。该判断依据是针对长时间持续电流的, 对于冲击电流引燃, 由于冲击波会破坏燃料床, 使燃烧的火星飞溅脱离燃料床, 很难达到持续3 min以上的燃烧。



图6 冲击电流作用下的可燃物着火现象

Fig. 6 Ignition phenomenon of combustible matter under the impulse current

自然界雷电放电时, 由于树木突出地表, 更容易成为雷击的目标。雷电在树干上形成放电通道, 同时产生热效应和机械破坏效应。机械破坏效应是由于焦耳热使树木内部水分受热急剧气化, 封闭于树体内的气体剧烈膨胀, 致使内外压差逐步变大, 进而在被击物体内部出现了强大的机械力, 使树木遭受破坏^[36]。Taylor提出了雷击引燃森林假设: 雷电击中并损坏针叶树之后, 就产生一种挥发性分离物和碎树皮、木材、针叶碎屑的混合物, 并使这种混合物点燃, 产生一种炽烈的持续时间短的火球或火柱, 而这种火球或火柱反过来又引燃树顶上或者森林地面上那些细碎闪光的燃料。本实验观察到的现象与Taylor的假设吻合。由于树木含水率较高, 且相比树下的杂草、松针难燃, 雷电击中树木后很难在树上蔓延。雷击产生的火星在喷溅过程中一部分在空气中散热熄灭, 一部分能够到达地表后持续燃烧, 进而引燃地上杂草, 在少雨干燥情况下, 初始火苗容易存活下来, 在条件合适后会转化成火灾。多数雷击火引燃后会自然熄灭, 少部分会引起阴燃, 只有极小部分(1/1 000~1/10 000)会最终形成森林

火灾^[37]。

呼伦贝尔草原雷击火重点区域的主要植被类型是樟子松+糙隐子草。我们通过冲击电流发生器, 对比了樟子松木片和糙隐子草燃料床的雷击临界着火特性, 如表1所示。

表1 樟子松木片和糙隐子草的雷击临界着火特性对比¹⁾
Table 1 Comparison of lightning critical ignition characteristics between *Pinus sylvestris* var. *mongolica* wood slices and *Cleistogenes squarrosa*

项目	糙隐子草燃料床	樟子松木片
$I_p / \text{kA}^{2)}$	21.44	95.48
$\int_0^t I^2 dt / (\text{A}^2 \cdot \text{s})^{3)}$	7 208	142 547
$\int_0^t UI dt / \text{J}^{4)}$	133	6 276

1) 冲击电流波形 8/20 μs ; 糙隐子草燃料床的堆积密度为 0.159 2 g/cm^3 , 含水率 0%, 厚度 1 mm; 樟子松木片含水率 0%, 厚度 1 mm; 2) I_p 冲击电流波形的电流峰值; 3) $\int_0^t I^2 dt$ 电流波形的平方对时间积分; 4) $\int_0^t UI dt$ 冲击电流输入的总能量。

在草床和木片厚度、含水率相同情况下, 取草床典型的堆积密度和木片进行比较, 可以发现糙隐子草燃料床的 I_p 、 $\int_0^t I^2 dt$ 、 $\int_0^t UI dt$ 比樟子松木片少, 临界着火所需能量更少, 更容易着火, 这主要是由于两种可燃物的着火温度和比热容不同。

3 结 论

本文首先研究了雷击的位置选择性, 通过测量三种典型的地表可燃物的击穿电压, 得到它们的击穿电压差异, 其中马尾松针燃料床的击穿电压最小, 绝缘性能最差; 通过测量不同含灰率的泥土电阻率, 发现随着含灰率增加, 电阻率减少, 人工烧除后的迹地更容易遭受雷击。

其次, 本文通过冲击电流发生器产生了模拟闪电, 冲击电流不仅可以加热可燃物至着火, 同时也能产生巨大的机械破坏效应, 使着火的可燃物飞溅甚至熄灭, 这影响了初始火苗转为森林火灾的可能性。观察得到的雷击着火现象与文献和自然界较吻合, 进一步验证了Taylor的假设。另外, 我们比较了典型植被结构中的树木和草的临界着火特性, 发现该结构中草比木片更容易被雷电引燃。

通过冲击电流发生器可以进一步探究雷击火的着火机理, 并可以进行定量比较不同含水量和

堆积密度对可燃物着火的影响。本文将为以后开展雷击火实验提供一种方法借鉴。在将来的工作中, 需要把可燃物雷击临界着火能量与自然界的

雷击着火实地数据进行对比, 以更好地验证人工模拟雷击设备的正确性。

参考文献:

- [1] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞, 等. 我国大兴安岭呼中林区雷击火发生火环境研究[J]. 林业科学, 2003, 39(6): 94-99.
SHU L F, WANG M Y, TIAN X R, et al. The fire environment mechanism of lightning fire formed for Daxing'an mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(6): 94-99.
- [2] PRICE C, RIND D. The impact of a $2 \times \text{CO}_2$ climate on lightning-caused fires [J]. Journal of Climate, 1994, 7(10): 1484-1494.
- [3] 白嘉懿. 四川木里森林火灾确认为雷击火, 整个火场已全面控制[N]. 中国新闻网, 2019-04-05.
BAI J Y. The forest fire in Muli, Sichuan Province was confirmed as a lightning fire, and the whole fire site has been fully controlled[N]. WWW. CHINANEWS. COM, 2019-04-05.
- [4] 于建龙, 刘乃安. 我国大兴安岭地区森林雷击火发生的火险天气等级研究[J]. 火灾科学, 2010, 19(3): 131-137.
YU J L, LIU N A. Lightning-caused wildland fire weather danger rating in Daxing'anling region [J]. Fire Safety Science, 2010, 19(3): 131-137.
- [5] ALBRECHT R I, GOODMAN S J, BUECHLER D, et al. Where are the lightning hotspots on Earth? [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97(11): 2051-2068.
- [6] WOTTON B M, MARTELL D L. A lightning fire occurrence model for Ontario [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35: 1389-1401.
- [7] 张吉利, 毕武, 王晓红, 等. 雷击火发生的影响因子与预测研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2674-2684.
ZHANG J L, BI W, WANG X H, et al. Lightning-caused fire, its affecting factors and prediction: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2674-2684.
- [8] TAYLOR A R. Ecological aspects of lightning in forests [J]. Proc Tall Timbers Fire Ecol Conf, 1974, 13: 455-482.
- [9] 李良福, 胡怀林. 森林雷电防护研究[M]. 中国: 气象出版社, 2004.
- [10] 周世谦. 雷电放电过程中雷击点选择性的机理研究[D]. 广西: 广西大学, 2004.
ZHOU S L. Mechanism of lightning strike selectivity during the process of discharge [D]. Guangxi: Guangxi University, 2004.
- [11] HERMAN R. An introduction to electrical resistivity in geophysics [J]. American Journal of Physiology, 2001, 69(9): 943-952.
- [12] 张润霞, 王益权, 解迎革, 等. 盐分对土壤电阻率的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 208-213.
ZHANG R X, WANG Y Q, XIE Y G, et al. Influence research of salts on the soil resistivity properties [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(2): 208-213.
- [13] 王乐凡, 余承华, 顾强康, 等. 不同含盐量饱和盐渍土电阻率试验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(4): 25-28.
WANG L F, YU C H, GU Q K, et al. A study of resistive experiment on saturated saline soil with different salinity [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2014, 15(4): 25-28.
- [14] 彭欢, 史明昌, 孙瑜, 等. 基于 Logistic 的大兴安岭雷击火预测模型[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(7): 166-169.
PENG H, SHI M C, SUN Y, et al. Lightning fire forecasting model of Daxing'an Mountain Based on Logistic Model [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(7): 166-169.
- [15] 孙瑜, 史明昌, 彭欢, 等. 基于 MAXENT 模型的黑龙江大兴安岭森林雷击火火险预测[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1100-1106.
SUN Y, SHI M C, PENG H, et al. Forest lightning fire forecasting for Daxing'anling Mountains based on MAXENT model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1100-1106.
- [16] 郭福涛, 胡海清, 马志海. 应用空间点模式方法研究大兴安岭雷击火空间分布格局[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6741-6747.
GUO F T, HU H Q, MA Z H. Spatial point process for spatial distribution pattern of lightning-caused forest fires in DaXing'an Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6741-6747.
- [17] 高永刚, 顾红, 张广英. 大兴安岭森林雷击火综合指标研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 87-92.
GAO Y G, GU H, ZHANG G C. Integrated Index Study on Forest Lightning Fire for Daxinganling Mountains [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,

- 2010, 26(6): 87-92.
- [18] HARTFORD R A. Smoldering combustion limits in peat as influenced by moisture, mineral content, and organic bulk density[C]//Proceedings of the Conference on Fire and Forest Meteorology, 1993: 282-286.
- [19] NIETO H, AGUADO I, GARCIA M, et al. Lightning-caused fires in central Spain: Development of a probability model of occurrence for two Spanish regions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 162-163: 35-43.
- [20] PODUR J, MARTELL D L, CSILLAG F. Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976-1998[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 164(1): 1-20.
- [21] LATHAM D J, SCHLIETER J A. Ignition probabilities of wildland fuels based on simulated lightning discharges[R]. US: Intermountain Research Station, 1989.
- [22] 朱易,刘乃安,邓志华,等. 雷击引燃森林可燃物概率的实验研究[J]. *火灾科学*, 2012, 21(2): 71-77.
- ZHU Y, LIU N A, DENG Z H, et al. Experimental study on the probability of lightning induced ignition of forest fuels[J]. *Fire Safety Science*, 2012, 21(2): 71-77.
- [23] DARVENIZA M, ZHOU Y. Lightning-initiated fires: Energy absorbed by fibrous materials from impulse current arcs[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D5): 10663-10670.
- [24] FUQUAY D M, TAYLOR A R, HAWES R G, et al. Lightning discharges that caused forest fires[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(12): 2156-2158.
- [25] Society of Automotive Engineers. SAEARP 5412. Aircraft lightning environment and related test waveforms [S]. USA: Ae-2 Lightning Committee, 2005.
- [26] 郭云力. 碳纤维增强树脂基复合材料雷击损伤的研究[D]. 山东:山东大学, 2014.
- GUO Y L. The research of lightning damage of carbon fiber reinforced polymer composite [D]. Shandong: Shandong University, 2014.
- [27] NECHMI H E, BEROUAL A, GIRODET A, et al. Fluoronitriles/CO₂ gas mixture as promising substitute to SF₆ insulation in high voltage applications[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(5): 2587-2593.
- [28] 周游. 雷电冲击电压下纳米粒子改变变压器油纸绝缘特性的机理[D]. 河北:华北电力大学, 2015.
- ZHOU Y. Influence mechanism of nanoparticles on the insulating properties of nanofluid/pressboard under lightning impulse voltage [D]. Hebei: North China Electric Power University, 2015.
- [29] 孙伟,陈文针. 冲击电流发生器的理论分析[J]. *高压电器*, 1999(4): 40-42.
- SUN W, CHEN W Z. Theoretical analysis of impulse current generator [J]. *High Voltage Apparatus*, 1999 (4): 40-42.
- [30] 刘志强. 雷电环境下复合材料层合板电-磁-热-结构耦合效应研究[D]. 陕西:西北工业大学, 2014.
- LIU Z Q. Analysis of electro-magneto-thermo-structural coupling effects on composite laminate in lightning environment [D]. Shanxi: Northwestern Polytechnical University, 2014.
- [31] 董琪. 碳纤维复合材料雷击损伤实验研究与数值模拟[D]. 山东:山东大学, 2015.
- DONG Q. Experimental and simulation study of the lightning strike damage of carbon fiber composites [D]. Shandong: Shandong University, 2015.
- [32] 邓鹤鸣. 雷电冲击电压下两相体放电特性研究[D]. 湖北:华中科技大学, 2010.
- DENG H M. The research on the characteristics of two-phase mixture discharges under lightning impulse voltage [D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [33] 聂向晖,杜鹤,杜翠薇,等. 大港土电阻率的测量及其导电模型[J]. *北京科技大学学报*, 2008, 30(9): 981-985.
- NIE X H, DU H, DU C W, et al. Electrical resistivity measurement and conductive model of Dagang soil [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(9): 981-985.
- [34] 高仲亮,李岩泉,张明远. 大兴安岭南部草甸计划烧除的防火效果评估[J]. *林业机械与木工设备*, 2015, 43(8): 19-21.
- GAO Z L, LI Y Q, ZHANG M Y. Evaluation of fire prevention effect of planned burning of meadow in southern Daxing'anling [J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2015, 43(8): 19-21.
- [35] ANDERSON K R. A model to predict lightning-caused fire occurrences [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2002, 11: 163-172.
- [36] 杜野. 雷击木的特征研究[J]. *森林防火*, 2018(1): 32-35.
- DU Y. Study on the characteristics of lightning strike wood [J]. *Forest Fire Prevention*, 2018 (1): 32-35.
- [37] WIERZCHOWSKI J, HEATHCOTT M, FLANNIGAN M D. Lightning and lightning fire, central cordillera, Canada [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2002(11): 41-51.