

气候变化背景下森林火灾发生规律研究*

魏书精¹ 罗斯生² 罗碧珍² 李小川¹ 王振师¹
吴泽鹏¹ 周宇飞¹ 钟映霞¹ 李强¹

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 2. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要 随着气候变暖加剧, 全球森林火灾灾害发生的频率与强度亦随之增加, 世界各地森林火灾潜在的危险将长期存在, 严重程度也将大幅增加。森林火灾对森林生态资源和全球气候产生了重大影响, 由于其突发性强、破坏性大、处置救助极为困难, 是当今世界最为严重的生态灾害和突发性公共事件之一。森林火灾发生发展规律是森林火灾预防与扑救的重要依据, 加强其规律研究有利于有的放矢地开展森林防灭火工作。针对气候变化现状及发展态势, 结合气候变化背景下国内外森林火灾现状, 系统论述了气候变化对我国森林火灾发生发展规律的影响, 主要阐述了气象条件影响森林火灾的发生, 气候影响森林可燃物, 气候影响森林火源, 气象影响森林火行为, 气候决定森林火灾周期以及气候变化对森林火灾时空分布规律的影响。在全球气候变暖的背景下, 从解析我国森林火灾发生规律入手, 通过气候变化背景下我国森林火灾发生规律的研究, 客观认识我国和各地区森林火灾发生发展规律, 从而为国家 and 地方各级政府有效开展森林火灾灾害防治和应急管理工作、切实保障社会经济可持续发展提供科学决策依据。

关键词 气候变化; 森林火灾; 发生规律; 生态系统管理; 应急管理

中图分类号: S762 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2020) 02-0133-11

Occurrence Regularity of Forest Fire under the Background of Climate Change

WEI Shujing¹ LUO Sisheng² LUO Bizhen² LI Xiaochuan¹
WANG Zhenshi¹ WU Zepeng¹ ZHOU Yufei¹ ZHONG Yingxia¹ LI Qiang¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization / Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract With the increase of global warming, the frequency and intensity of global forest fire disasters will also increase. The potential risk of forest fires around the world will exist for a long time and their severity will also increase significantly. Forest fires have had a significant impact on forest ecological resources and the global climate. Because of their sudden, destructive, and extremely difficult handling, it is one of the most serious ecological disasters and sudden public events in the world. The law of forest fire occurrence and development is an important basis for forest fire prevention and suppression. Strengthening the study of the law is conducive to targeted forest fire prevention and extinguishment. Aiming at the current situation and development trend of

* 基金项目: 广东省林业科技创新平台建设项目 (2018CXPT001); 国家自然科学基金面上项目 (41371109); 广西自然科学基金项目 (2014GXNSFBA118108)。

第一作者: 魏书精 (1979—), 男, 副研究员, 主要从事森林防灭火及森林生态研究, E-mail: weishujing2003@163.com。

通信作者: 罗碧珍 (1982—), 女, 讲师, 主要从事森林防灭火及森林生态研究, E-mail: luobizhen8@163.com

climate change, combined with the status quo of forest fires at home and abroad in the context of climate change, the effects of climate change on the occurrence and development of forest fires in China are systematically discussed. The climate affects the source of fire, the weather affects the behavior of forest fires, the climate determines the cycle of forest fires, and the impact of climate change on the spatial and temporal distribution of forest fires. Under the background of global warming, we start with the analysis of the occurrence of forest fires in China. Through the study of the occurrence of forest fires in China under the background of climate change, we can objectively understand the laws of forest fires in China and in various regions. The government effectively carries out forest fire disaster prevention and emergency management, and effectively guarantees sustainable development of society and economy to provide scientific decision-making basis.

Key words global change; forest fires; occurrence regularity; ecosystem management; emergency management

随着气候变暖加剧,全球森林火灾灾害发生的频率与强度亦随之增加,世界各地森林火灾潜在的危险将长期存在,严重程度也将大幅增加。森林火灾对森林生态资源和全球气候产生了重大影响,由于其突发性强、破坏性大、处置救助极为困难,是当今世界最为严重的生态灾害和突发性公共事件之一^[1-2]。森林火灾是林业系统唯一列入国家十三个重大公共安全灾害,并进入国家级应急预警预案的灾种之一。火生态因子作为陆地生态系统中非连续生态因子,对生物地球化学循环以及大气的化学循环和生态系统碳循环发挥重要作用^[3-5]。陆地生态系统经常受到森林火灾灾害的影响,在危害森林生态系统的诸因子中火因子是一种最具破坏性的生态灾害^[2,6]。全球气候暖干化与森林火灾频发密切相关^[7-9]。气候暖干化引起植被干燥程度的变化,从而影响森林火灾的动态变化。气候变暖对森林火灾的影响主要通过降水格局的改变进而影响森林可燃物分布及载量的变化,进而对森林火灾发生的难易程度以及火灾蔓延速度产生影响,从而改变森林的火行为,影响森林火灾发生发展规律。同时,森林火灾对森林生态资源和全球气候产生了巨大影响,森林火灾排放物将对气候变化产生反馈作用,所产生的气候变化进一步影响森林火灾,而森林火灾反过来又影响碳循环,碳循环又反作用于气候变化的正反馈机制。森林火灾排放物导致气候变暖,而气候变暖又对植被以及森林火灾动态产生影响。由于近期全球气候变暖的原因,造成全球发生森林火灾的次数频率增加、火灾面积扩大,不但破坏生态环境,危害生态安全,而且危及人类的生命和财产安全。

森林火灾对森林生态资源和全球气候产生了重大影响,因而森林火灾与气候变化之间的密切关系成为近年来学者们研究的热点问题^[10-12]。森林火灾的发生发展受气象条件、地形地势、植被状况、道路通达性、扑救水平、防治能力,人口居住密度、用火安全意识等诸多因素的影响而呈现相应的时空分布规律,在所有因素中其中气象条件对森林火灾的发生发展产生的影响最大^[8,13-14]。因此,站在新的历史高度重新审视全球变暖背景下我国森林火灾的发生发展规律,把握我国森林火灾的发生发展规律,进而提出行之有效的应对策略,对于指导人类应对全球气候变化和控制适度的森林火灾,实行森林火灾生态系统管理,对科学高效地做好林牧区以及乡村振兴工作具有重要的理论和实践意义。通过气候变化背景下我国森林火灾发生规律的研究,客观认识我国和各地区森林火灾发生发展规律,从而为国家 and 地方各级政府有效开展森林火灾灾害防治和应急管理工作、切实保障社会经济可持续发展提供科学决策依据。森林火灾发生发展规律是森林火灾预防与扑救的重要依据,加强其规律研究有利于有的放矢地开展森林防火工作。

1 气候变化现状及发展态势

1.1 全球气候变化状况

随着全球气候变暖、森林火险等级上升,世界各地森林火灾发生的频率与强度增加,从而导致森林火灾造成的灾难性后果已引起科学家们的高度关注^[15]。根据欧盟哥白尼气候变化服务中心(CCCS)的数

据, 2020 年 1 月是官方数据记录中最热的 1 月, 与 1981 年至 2010 年 1 月的平均气温相比, 2020 年 1 月的气温升高了 0.77°C , 比 2016 年 1 月高出了 0.3°C 。由于气候变化和厄尔尼诺气候循环, 2016 年是有记录以来最热的一年, 2020 年正在超越 2016 年, 这一事实提醒人们, 人类活动正在对世界产生影响。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 2013 年发布第 5 次气候变化评估报告, 报告认为, 在工业化进程中, 毫无约束地大量排放温室气体, 使地球表面温度上升了 $1.4\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ [16]。气候变化要比原来认识到的更加严重, 而有 95% 以上的把握认为气候变化是人类的行为造成的。报告预测 2016 到 2035 年的平均气温会高出 $0.3\sim 0.7^{\circ}\text{C}$, 升温的趋势仍然会继续。IPCC 第六次评估报告第一工作组第一次主要作者会议亦指出, 未来全球气候将持续变暖, 极端事件发生的频率增加。

目前, 全球气候变化问题是人类面临的巨大挑战 [17-19]。近百年来, 极端气候事件 (如厄尔尼诺、拉尼娜、干旱、冰雹、风暴、高温天气和沙尘暴等) 发生的频率和危害增加, 从而影响森林生态系统。气候变化引起了森林可燃物类型与可燃物载量的变化, 造成林火行为的改变, 促使森林火灾发生几率变大, 发生区域扩大, 森林防火期延长 [20-22]。

1.2 气候影响森林火灾发生频率

在中国的北方地区, 温度低于 0°C 的天数显著减少, 温度高于 35°C 的天数增加, 自 1990 年以来观察到霜冻天数显著减少 [23]。近年来, 中国的许多地区, 干旱与洪涝的发生频率增高、强度增强, 但存在区域差异。降水量时空分布不均匀, 在我国南方地区的降水量增加, 而北部的降水则有所减少, 在西部地区, 降水日数的频率和强度显著增加 [24], 而在长江流域, 1961—2001 年间, 夏季极端降水事件每 10 年增加 $10\%\sim 20\%$ [25]。

大量研究表明全球气候变暖已是一个不争的客观事实 [15, 26-27]。在全球变暖的背景下, 一系列连锁反应不可避免地逐渐出现。首先降水量时空分布发生变化, 大陆地区尤其是中高纬地区降水增加, 非洲等一些地区降水减少; 陆地上湖泊水位下降、面积萎缩; 海洋中海平面上升有可能对海岸带和海洋生态系统产生不利影响, 造成海岸地区遭受洪水、风暴的干扰频率和强度加剧。其次, 气候变化已经并将继续改变森林植物群落的结构、组成及生物量和燃烧性, 导致对森林生态系统产生重要影响, 这些均给森林生态系统带来前所未有的挑战。

1.3 气候变化危害日益严重

近年来, 由于全球气候变暖, 全球以及区域尺度上极端气候事件发生的几率均呈现出增加趋势, 尤其是厄尔尼诺、持续干旱等各种灾害的影响, 造成各地高温、干热所引发的森林火灾灾害持续呈现, 严重影响农林牧业和渔业生产、给人类造成的损失增加 [27-29]。据有关资料研究表明, 不管是发达国家还是发展中国家均呈现出森林火灾随气候变化而波动, 即气候相对干旱的年份, 森林火灾次数就相对多, 而且灾害的破坏程度也相对较大, 而湿润的年份, 森林火灾发生就较少, 灾害的破坏程度也相对较小。根据我国灾害种类的分布、程度与影响特征, 我国主要灾害类型包括地震灾害、地质灾害、气象灾害、水旱灾害、森林和草原火灾、海洋灾害 6 大灾害类型, 其中, 气象灾害包括暴雨、干旱、台风、高温、低温、风雹、雪灾、雷电等对森林可燃物、气象条件及森林火源均产生重大影响。气候变化将对人类的生存、生产和生活产生极为深刻的影响。林业是反应较为敏感的行业, 气候变化会使森林植被的布局、结构出现变动, 进而大幅度增加森林火灾发生的强度和频率。同时, 气候变暖将造成高温热浪天气有所增加。从目前世界各地森林火灾发生发展的态势可知, 气候变化对森林火灾的影响面临严峻形势。

气候变化导致气温上升和降水量时空分布发生变化, 从而增加森林火险等级、进而增加火灾发生频率、火灾强度和过火面积。Pitman 等 [30] 通过对气候变化与森林火灾之间的环境模拟显示, 2050 年森林火灾发生概率将比目前增加 25%。Allen 等 [29] 研究发现, 随着全球变暖造成高温、干旱灾害持续时间和发生频率增加, 从而造成森林火灾易发频发。

1.4 人为因素导致气候变暖

近年来, 全世界各国科学家对属于自然科学领域的气候变化方面的研究高度关注, 自从 1988 年特别成立联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 以来, IPCC 于 1990 年、1995 年、2001 年、2007 年和

2013年5次发布评估报告,这五次评估报告成为国际社会应对气候变化时的科学依据。最近一次,2013年的评估报告则指出,人类活动是导致过去50年气候变化的最为可能的主要原因。从IPCC评估报告的变化中可知,通过大量的观测数据和科学模型研究使得“人类活动是气候变暖的主要原因”渐渐成为全球共识^[16,27,31]。人为因素造成气候变暖主要是通过过度的开采和使用化石燃料,造成排放到大气中的温室气体浓度远远超过大气中的容量,导致大气中吸热和散热的失衡。另外,人类无节制地利用森林资源以及城市化等原因造成土地资源过度开发,进而破坏和减少了森林生态系统碳固持与碳汇潜力。这些人为活动均对气候变暖产生较大影响。

2 气候变化背景下森林火灾现状

由于气候变化,森林火灾次数、面积及强度增加。根据联合国粮农组织统计,世界每年森林火灾达22万次以上,烧毁森林面积646.5万公顷以上,约占世界森林面积的2.3‰,世界每年森林火灾损失木材3亿m³^[32]。其中美国、欧洲、俄罗斯、澳大利亚、蒙古、南非、印度尼西亚等国是森林火灾重灾区。年均火灾面积在百万公顷以上。近年来,世界各地森林大火不断。2015年9月份以来,印度尼西亚发生森林大火,且火势不断蔓延,导致新加坡,马来西亚等地区长期雾霾。2016年5月3日加拿大阿尔伯塔省石油重镇麦克默里堡遭遇了史上最严重森林火灾。2016年8月10日,法国南部地中海海岸发生重大森林火灾。2017年8月28日,巴西南部的阿拉瓜亚国家公园内,发生严重的森林火灾。2019年9月30日已在亚马孙雨林地区勘测到72843处着火点,造成严重的森林火灾。2017年10月8日晚,美国加州发生森林火灾致31人死亡,逾2万人疏散。2017年12月4日,美国南加州开始发生山林大火。2018年11月8日,北加州“坎普”山火成为加州历史上最具破坏性的一次火灾。

最近100年里,中国的气温上升了0.4~0.5℃,其中在季节上以冬季影响最大,在地区分布上西北、华北和东北地区影响最大。与全球对未来预测的情况一样,我国气候也将继续变暖。到2020—2030年,全国平均气温将上升1.7℃;到2050年,全国平均气温将上升2.2℃,变暖幅度由南向北增加。不少地区降水出现增加趋势,但华北和东北南部等一些地区将出现继续变干的趋势。未来长江流域出现连续大旱的可能性较大,部分地区的干旱程度、范围、持续时间还将进一步加剧。渤海沿岸和长江出海口地区的台风最大风速将增加约19%,破坏性更强^[27]。我国1950—2015年均森林火灾次数1.1万次,年均面积56.3万hm²,死亡110人,伤1000余人。2017年,全国共发生森林火灾3281起,比2016年增长58.46%,与前三年(2014—2016)均值相比,上升11.48%。其中,一般森林火灾2258起,较大森林火灾发生958起,重大森林火灾4起,特大森林火灾3起。而2016年未发生特大森林火灾,全国因森林火灾受害森林面积2.76万hm²,比2016年上升293.69%。因此,从以上数据可看出,在全球气候变暖的背景下,我国的森林火灾防治的形势依然严峻。近年来,气候条件异常干旱少雨,气温明显偏高,特别是在森林防火期中更为突出,这是导致我国森林火灾居高不下的主要原因。2019年春季以来,我国山西、四川、内蒙古、河北多地频发森林火灾,山西、四川、陕西、云南、辽宁等地先后发生重大森林火灾,导致了森林资源及生态环境的严重损失,造成严重人员伤亡^[33]。

3 气候变化影响森林火灾发生规律

3.1 气象条件影响森林火灾的发生

我国南北相距约5500km,跨纬度近50°,东西相距约5200km,跨经度超过60°,由于幅员辽阔,纬度差异大,导致气温差异大,形成寒温带、温带、亚热带等不同的地带性植被带,相应地亦形成了森林火灾发生的不同时空规律。由于各地植被分布、火源状况、气象条件和地形地貌的不同、形成了森林火灾日变化,季节变化、年际变化等不同的变化规律,尤其是气象因子的变化直接影响森林火灾的发生发展、火灾蔓延、森林火行为以及森林火灾的周期波动。气象因子之间的相互关系是森林火灾发生规律研究的重要内容之一^[34]。森林燃烧需要有可燃物、火源和火险天气,三者缺一不可。一般而言、长期干旱、气温高、相对湿度低、大风天气容易发生火灾。全球气候变暖将对森林可燃物造成极大影响,从而

诱发森林火灾的发生频率增加, 进而造成森林大火。

3.1.1 气温 据气象资料显示, 森林火灾一般发生在当天最高气温的前后两小时左右, 因而森林火灾的发生与最高气温存在一定的相关性^[35]。温度与森林火灾的发生十分密切, 气温高, 森林可燃物温度亦升高, 相对湿度减小, 水分易蒸发, 导致可燃物干燥, 易于点燃, 火灾容易蔓延成灾。气温变化包括日变化、月变化、年变化等。Drever 等^[36]研究了森林火灾与气温日变化的关系后认为 10~20℃时发生火灾几率最大。统计分析表明: 月平均气温在 -10℃以下时发生森林火灾几率最小; 在 -10~0℃时, 发生森林火灾的几率较大; 而在 0~10℃时森林火灾发生的几率最大, 危害亦重; 在 11~15℃时相对而言火灾减少; 15℃以上时森林火灾发生几率最小。因此, 气温是森林火灾发生发展的重要影响因子。随着地表气温不断上升, 导致森林火险期的提前和延长, 从而导致森林火灾风险增加。

Lindner 等^[37]研究表明, 在北欧和西欧大气中二氧化碳含量的增加和气温的升高至少在短期和中期影响森林生长和木材生产。此外, 温度升高的影响因地点不同而异, 较高的温度延长了生长季节, 并可能增加光合作用, 特别是在北纬地区。张艳平等^[38]分析了大兴安岭的气候变化规律, 研究了近 34 年来森林火灾发生规律, 得出了进入 21 世纪以来, 年际及各季节降水减少、且气温升高, 夏季干旱化趋势较为严重。随着气候变暖造成森林易燃可燃物数量和可燃物载量增加, 森林可燃物燃烧性加大, 特别是高纬度地区雷击火增多, 发生森林火灾的概率增大。

3.1.2 降水量与相对湿度 降水量包括水平和垂直降水。降水量直接影响空气相对湿度、干燥程度。在少量降水的干旱季里, 植被的含水量显著下降, 如再遇连续的干燥, 植被含水量亦随之降低, 就形成易燃的植被状况, 从而容易导致大火的发生。Bravo 等^[39]发现降雨与阿根廷的火灾发生频率正相关, 因为降雨促进植被的生长, 导致可燃物的积累, 从而形成有利于火环境。Govender 等^[40]研究表明, 由于降水量的增加, 可燃物载量从 2 964 kg·hm⁻² 上升到 3 972 kg·hm⁻², 增加森林火险等级。同时, 降水量大小也是决定森林火灾是否蔓延的重要因素, 降水量小, 天气就干旱, 空气干燥, 森林火灾发生几率就增高, 而且会造成森林火险期延长, 导致森林火灾更为严重。气候变暖导致空气相对湿度的季节变化和日变化均很大。相对湿度与天气的变化、降水量、森林可燃物含水率有直接的关系, 天气的变化、降水量的变化、森林可燃物含水率的变化制约着相对湿度。

统计数据表明, 森林火灾的发生几率与天气干旱程度有关^[41]。田晓瑞等^[42]认为, 气候变暖将使火险增加, 从而促使森林火灾发生几率增加。王明玉等^[43]研究发现高海拔地区发生森林火灾的几率更大。田晓瑞等^[43]研究发现厄尔尼诺现象引发的高温和干旱对我国森林火灾的影响巨大。空气湿度是影响森林可燃物干湿程度变化的重要因素。胡海清等^[44]研究认为空气干燥程度对森林火灾燃烧率格局产生较大影响。

3.1.3 大风 风力风速是诱导森林火灾发生率提升的关键因素, 也是导致森林火灾蔓延、火灾发展的重要气象因子^[8]。研究表明, 大风起到风助火势, 火借风威的作用, 风速加大、从而引发特大火灾。总体而言, 极端天气下火灾的发生区域、火强度主要由大风和较低的空气相对湿度来解释。研究表明, 大风不仅能加速地表水分蒸发促使林区植被干燥, 大风还促使森林火灾燃烧氧气供给充足, 从而导致燃烧速度加快, 火蔓延速度加剧, 变小火为大火^[54-55]。如果在一天之内温度上升 5~10℃, 而风速又快, 就易发生森林火灾, 可以说月平均风速愈大, 大气乱流就越强, 因而使火花飞溅, 把正在燃烧的枯枝落叶卷起, 随风运行, 成为新火源, 造成飞火, 也引发其他特殊火行为。此外, 空气的强烈上升, 还可把火焰带到高处使树冠发生燃烧, 形成树冠火, 更为严重的是强劲的风力还可引起火场死灰复燃, 使火灾扩展蔓延, 带给消防人员较大的安全隐患。

3.1.4 干旱与高温 长期的森林火灾历史研究表明, 气候是森林火灾发生周期性波动的关键因子^[47-48]。连旱天数越长, 水分蒸发越大, 水分得不到补充, 地表物干燥、增加可燃性。全球气候的持续变暖对森林火灾的发生和发展造成了很大的影响。有研究发现自 20 世纪 80 年代中期随着平均气温明显升高, 森林火灾发生的频率有明显增加的趋势。统计数据表明, 包括 1987 年发生在大兴安岭特大森林火灾在内的案例, 都是在干旱、高温的火险天气条件下发生的。特大森林火灾的发生与当地的天气条件密切相关,

干旱持续时间长,易引起森林火灾,会导致森林火灾的爆发,并极有可能导致森林大火。Fensham等^[49]研究表明热带雨林发生火灾的时间与严重干旱相关,且强调了气候循环对热带树种种群结构的重要性。

3.2 气候影响森林可燃物

气候变化对森林生态系统的结构(物种构成)、功能以及分布均会产生巨大影响。森林生态系统的结构主要是指森林植被的构成及其状态等,包括树种组成结构、空间结构、年龄结构等。气候变化对森林生态系统的结构产生重要影响。Wang等^[50]通过Landis Pro模型预测了2000—2300年之间美国阔叶林区森林结构将发生重要变化。吴正方^[51]研究发现在气候变暖情景下,中国东北阔叶红松林分布区将发生明显北移趋势。冷文芳等^[52]研究发现未来气候若呈暖干化,兴安落叶松、长白落叶松和华北落叶松均可能向北方向退缩。随着气候变暖,森林生态系统的结构改变以及植被带的迁移过程中,一些植被由于未能较好地适应新环境而死亡,进而造成森林可燃物的增加,同时可能造成森林燃烧性的改变,从而导致森林火险等级增加。Allen等^[29]研究发现由于干旱灾频发,造成森林结构和生物地理发生改变,导致树木死亡率加剧,从而增加森林的燃烧性。

气候因子是造成植被变化的主要因素,特别是气温和降水量的改变,对植被的生长、分布及其理化性质产生重要影响。气候变暖通过改变森林可燃物的理化性质进而导致其燃烧性的变化。随着可燃物载量大,大多林分处于易燃状态,发生森林大火的可能性较大。张峰等^[53]研究发现气候变化通过对物候期的改变,从而改变植被生产力与植被的理化性质,导致易燃森林可燃物增多,进而造成森林火灾发生频率加剧。气候变化通过对森林可燃物理化性质的改变,如森林可燃物的燃点、热值及挥发油含量等,进而影响森林的易燃性及燃烧性。长期的土壤干旱容易造成植物体内挥发油含量增加,而挥发油含量大的植物燃点低、热值高,进而增加着火的燃点以及着火后的火强度^[54]。Turtola等^[55]研究发现在特别干旱天气下,苏格兰松(*Pinus sylvestris*)的树脂含量相比苗木提高了39%,树脂含量的提高,降低了燃点,导致森林火灾发生的几率增加。在气候变暖背景下,气候变暖以及气候变暖造成的植被理化性质变化易引起森林可燃物积累,从而导致森林火灾燃烧性增大,森林火险等级升高。

3.3 气候影响森林火源

气候变化对森林火源的影响机制是气象因子、植被状况和人为因子等交互作用的结果。随着气候变暖,极端气候出现的年份呈增加趋势,导致火险等级增强、火灾发生几率增加。近年来,气候变化造成雷击发生的频率呈爆发之势^[15]。李兴华等^[56]研究发现,2000年以后受高温、干旱等的影响,雷击火增加,导致森林火灾呈现增加趋势。Price等^[57]研究发现美国雷击次数的增加导致着火点数量增加了40%左右。Lynch等^[58]对美国阿拉斯加的森林火灾研究发现随着气候变暖,雷击火源显著增加。气候变暖引起异常天气增加,从而影响森林可燃物的载量及燃烧性,增加着火几率,进而影响森林火源。气候是森林火灾的主导因素,研究发现气候暖干化时期森林火灾发生几率增加^[59]。气候变暖导致的高温、干旱、大风的火险天气容易导致森林火灾,同时由于气候变暖造成的辐散效应,辐射增强,蒸发量增大,导致地被物干燥,这也容易引发森林火灾。由此可知,气候变暖导致火险天气增加,植被燃烧性增强,雷击火频率增多,从而对森林火源产生重要影响。森林火灾虽多数是人为引发,但随着气候变暖雷击山火出现频率增加,增加火源的来源。

3.4 气候影响森林火行为

火行为主要包括森林火灾的蔓延速度、森林火灾强度和森林火灾烈度等。气候变化影响了森林燃烧的火环境,从而影响火行为的发生发展以及火行为的表现,造成特殊火行为发生的频率升高,导致巨大的人、财、物的损失。与森林火灾发生发展相关的气象要素很多,包括气温、气压、风、湿度、云、降水以及各种天气现象,以及各种气象要素的有机组合。气象因素可通过对森林可燃物干湿条件的改变,进而对森林火灾的发生、火蔓延速度和火行为产生影响。随着气候变暖,气温升高,降水量下降,森林内空中、地表和地下可燃林均变得日益干燥,从而导致森林火行为的变化多样与复杂化,尤其是特殊火行为的增加,进而增加森林火灾扑救的危险性以及火灾损失程度。Stuart等^[60]研究发现森林可燃物类型、含水率以及环境的相对湿度、气温和风速等因子对森林火灾蔓延产生重要影响。研究发现2008年

初由于我国南方的低温雨雪冰冻灾害, 造成树木大批折断, 地表可燃物猛增, 平均地表可燃物载量超过 $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^2$, 达到发生森林大火条件^[61]。

3.5 气候决定森林火灾周期

气候变化对森林火灾周期的影响, 主要包括全球循环模式(如厄尔尼诺—南方涛动)等对森林火灾动态的影响^[12]。全球气候变化对森林火源和森林可燃物的分布产生重要影响, 并影响森林可燃物载量与燃烧性, 从而导致森林火灾呈现周期性^[43]。研究发现, 中国森林火灾的年际变化有 5~6 年和 10 年左右的准周期变化规律^[62]。研究数据发现森林火灾的发生具有准周期性, 这主要取决于气候的变化。一般而言, 春夏连旱、持续增温, 森林防火期明显延长。近几年来, 由于气候变暖的结果, 尤其是极端气候现象的出现, 因而严重影响森林火灾的发生发展, 造成森林火灾周期性缩短, 而过火面积也在增大。季节性和地域性是森林火灾发生的独有特征, 由于气候条件发生准周期波动, 导致森林火灾发生呈准周期波动。研究发现, 在北半球, 北回归线至北极圈均发生过较大森林火灾; 特别是在高纬地区, 高温干旱时, 森林火灾发生的频率和强度增加。由于气候变化造成的森林火灾险期延长, 尤其是北方森林火灾明显增加, 从而对森林火灾周期产生重要影响。

3.6 气候变化对森林火灾时间分布的影响

随着全球气候变化的加剧, 我国的森林防火期有明显延长和提前趋势, 由固定的季节性向非固定性扩展的发展趋势, 使森林火灾的时间分布产生新变化, 森林防火工作任务加大, 火灾损失巨大。为应对气候变化对森林火灾时间分布的影响, 许多地方的森林防火期延长, 如《广东省森林防火条例》第十六条规定本省实行全年森林防火, 每年十月一日至次年四月三十日为森林特别防护期。目前, 气候变化对森林火灾时间分布规律的研究主要是从年际变化规律、月际变化规律(季节变化规律)、日际变化规律等时间尺度进行研究的。人类活动对森林火灾发生规律的影响虽日益增强, 但是气候变化才是森林火灾发生规律变化及森林火灾动态变化的关键因子^[63]。黄红^[64]研究发现, 贵州省森林火灾发生次数最多年份是最少年份的 9 倍多, 而且呈现增多的趋势。金森等^[65]研究发现黑龙江省森林火灾主要发生在 4 月和 5 月。这些研究均表明森林火灾的发生出现了年际差异, 而且主要是由气候变化引起了森林火灾的年际变化规律。

我国森林火灾的月际变化规律(季节变化规律)非常明显, 在我国一年四季, 只要降水量少, 高温干旱, 均有可能发生森林火灾。我国东北地区(包括黑龙江省、吉林省、辽宁省以及内蒙古自治区东部)森林火灾一般在春、秋两季发生, 而我国的广大南方地区森林火灾主要在秋季、冬季和春季发生^[66-67]。张玉等^[68]研究发现, 我国夏季森林火灾发生次数表现出增加规律。在我国, 森林火灾发生在一些重点时节表现更为明显, 如清明节, 我国许多地方森林火灾发生次数最多。陶玉柱等^[69]研究发现中国森林火灾一日之内主要在 04:00—18:00 时发生, 其中 11:00—15:00 时是森林火灾发生频率最高的。黄真光^[70]通过对福建省武夷山的森林火灾研究发现中午时段森林火灾发生几率最大。于成龙等^[71]研究发现黑龙江省大兴安岭森林火灾主要发生 11:00—15:00 时这个时段。

时间尺度不同, 森林火灾发生的控制因素也不同。通常, 在一天之内天气是森林火灾发生的控制因素, 在不同季节间植物的生长状况, 以及气候条件是森林火灾发生的控制因素, 在一年之中降雨的分配是控制因素。

3.7 气候变化对森林火灾空间分布的影响

近年来, 随着景观生态学、区域生态学与全球生态学的发展, 人们对空间的认识越来越深入。随着对空间认识的深入, 研究者发现不同区域的森林火灾是不相同的。各种生态学理论越来越多地应用于气候变化对森林火灾空间分布的研究中。目前关于气候变化对森林火灾空间分布的研究中多数为描述性的定性描述研究较多, 而定量描述较少^[72]。Liu 等^[73]研究表明, 所有森林火灾发生与人类对自然景观的可达性密切相关, 道路密度和邻近的居民点是最重要的因素。因此了解人类活动对火灾发生的分布对于气候快速变化的情况下降低火灾风险至关重要。王明玉等^[74]研究发现气象要素对森林火灾空间分布具有决定性影响。王明玉等^[75]应用黑龙江省森林火灾历史数据进行了森林火灾质心分析, 发现该森林火灾火场

质心以一定的中心表现分布规律。

在全球气候变化背景下,森林火灾的地理空间分布不断增加,森林火灾发生时间延长,森林燃烧性加大,受森林易燃性的影响,森林火灾呈现新的地理空间规律。森林火灾一般干旱季节发生,因而森林火灾在我国的空间分布会随着降水量的影响而发生变化。

4 展望

为应对全球气候变暖,降低我国森林火灾发生,减少火灾损失,充分利用森林火灾的有益性,实现维护森林生态系统平衡和保护生态安全的目标,为此应转变观念、创新理念,针对我国传统的森林防火工作的挑战,应选择现代森林生态系统管理的路径,应充分发挥森林火灾的各种效益,对森林火灾进行科学、系统、动态的管理。系统是由相互作用的若干要素组成的集合体。现代森林生态系统管理是一个由预测预报、阻隔、通讯、运载等要素耦合的综合系统。森林生态管理系统的功能如何,不仅表现为各要素的好坏,亦不是所有要素的简单叠加,而是取决于森林生态管理系统诸要素间的结构有序程度和组织合理程度及其功能的充分发挥。因此,在森林生态系统管理过程中必须充分发挥各要素的优化配置。遵循森林火灾的自组织特性,发挥系统论、控制论、信息论的原理,进一步优化森林生态系统管理诸因子的作用,提高系统的整体性功能。

面对全球气候变暖的大背景,为经济有效地实现森林火灾管理的目的,达到森林火灾生态系统管理的目标,要充分利用林火干扰在森林生态系统平衡和生态安全的效应,发挥其在减少碳排放,降低火强度,促进森林进展演替中的应有作用。用现代森林生态系统管理思想替换传统的森林防火,积极利用火因子的生态效应,积极应对现行森林防火所面临的挑战,开创森林生态系统管理的森林防火新局面与新路径。建立健全森林火灾危险性调查与评估指标体系和技术规程,积极开展全省森林可燃物调查、野外火源调查和气象条件调查,主要对森林可燃物类型及载量、可燃物含水率、可燃物燃烧性等可燃物属性进行调查,获取森林火灾的致灾孕灾要素信息,全面掌握全省森林可燃物、野外火源和气象条件的分布情况,结合多源遥感数据,进行森林火灾危险性综合研判与分析,形成森林火灾危险性调查与评估数据库、建设森林火灾危险性调查与评估数据库。建立森林可燃物动态监测、多尺度评估的技术方法和模型库,进行森林火灾危险性综合研判与分析,开展森林火灾危险性评估,为森林火灾的预警决策提供科学依据。建立健全森林火灾重点隐患评价和分级指标体系,并在此基础上,通过开展森林火灾重点部位的隐患排查工作,全面掌握我省森林火灾隐患分布、分级情况。最终形成森林火灾重点隐患排查成果数据库、隐患分布图、隐患等级分布图等系列成果,强化火源管控,有的放矢地预防森林火灾。

加强机构建设,完善组织体系。各地要严格按照《关于完善森林和草原防灭火体制机制的意见》,切实加强森林防火机构和管理队伍建设,各地应独立设置防火机构,确保林业系统防火组织体系完整。加强部门协作,形成工作合力。森林公安是防火工作的重要力量。按照《森林公安机关管理体制调整工作实施方案》,森林公安划归公安部门领导后,职能保持不变,业务上接受林业部门指导,继续承担森林防火工作。各地林业主管部门要主动对接同级公安机关,严格落实“基层森林公安特别是派驻林区的,队伍架构和力量布局保持基本稳定”要求,在森林公安转隶、机构设置、“三定方案”编制等方面加强沟通,确保公安机关承担的防火和其他职责落到实处。加强队伍建设,明确职责边界。加强护林员队伍建设,落实经费保障,提高工资待遇,加强培训教育,及时修订森林火灾早期处置预案,开展处置演练和常态化的训练,提高火灾早期处置能力。同时,根据《关于完善森林和草原防灭火体制机制的意见》,林业主管部门与相关职能部门就森林防灭火等工作进行职责划分,进一步织牢编密防灭火责任落实这张网,力争做到全覆盖,无盲区和漏点。加强隐患排查,强化火源管控。林业主管部门要高度重视森林防火工作,坚持“防”字为先,严格火源管理,严防火源上山,全面压实镇村基层防火责任,确保森林防火措施落实落细。在每个重要时期,尤其是森林特别防护期,各地应开展森林防灭火工作专项检查,查找存在问题,针对薄弱环节限期整改,做到隐患没查清不放过,问题没整改不放过,责任不落实不放过,确保森林防火各项措施落实到位。加强防火宣传,强化防火意识。要高度重视防火宣传教育这道防火墙,

督促各地加大宣传教育的力度, 广泛宣传防火法律法规和制度, 推进森林防火的知识进课堂、进社区、进林区、进农户、进旅游景区, 提高群众森林防火意识, 让全社会绷紧防火这根弦。

有效应对森林火灾必须快速反应, 科学决策, 果断处置, 提高早期处置能力。各级森林防灭火部门必须制订切实可行的森林火灾应急预案及早期处置预案, 通过理顺各级森林防灭火相关部门的职责, 加强各部门协调和密切配合。要加强灭火演练, 完善重特大森林火灾预案的可操作性; 及时修订森林防火条例, 进一步强化组织领导, 加强森林防火法律法规建设, 林业部门要保证第一时间发现火灾, 第一时间到达火场, 积极扑救初期火灾。应急管理部门要发挥综合应急作用, 统一组织指挥、积极协调调度、高效保障服务, 一旦发生重大火灾, 要第一时间组织足够力量扑救火灾。同时应加强森林防火基础设施建设, 尤其是防火道路(森林防火应急救援通道)、森林消防水源和航空护林基础设施建设, 增加科研经费投入, 加强区域性森林防火方面的科学研究, 加强新技术新装备的开发和应用, 实现天地空一体化的现代灭火新战法, 提升快速有效控制和扑灭森林火灾的技术水平。

参考文献

- [1] 金森. 黑龙江省森林火灾规律研究Ⅲ: 大尺度水平森林火灾与森林类型之间的关系研究[J]. 林业科学, 2002, 38(4): 171-175.
- [2] DOERR S H, SANTÍN C. Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world[J]. Phil. Trans. R. Soc. B, 2016, 371(1696): 20150345.
- [3] LOEHMAN R A, REINHARDT E, RILEY K L. Wildland fire emissions, carbon, and climate: seeing the forest and the trees-A cross-scale assessment of wildfire and carbon dynamics in fire-prone, forested ecosystems[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 317: 9-19.
- [4] LITTELL J S, PETERSON D L, RILEY K L, et al. A review of the relationships between drought and forest fire in the United States[J]. Global change biology, 2016, 22(7): 2353-2369.
- [5] THONICKE K, VENEVSKY S, SITCH S, et al. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model[J]. Global Ecology and Biogeography, 2001, 10(6): 661-677.
- [6] 舒立福, 田晓瑞, 寇晓军. 林火研究综述(I): 研究热点与进展[J]. 世界林业研究, 2003, 16(3): 37-40.
- [7] BIRD R B, BIRD D W, CODDING B F. People, El Niño southern oscillation and fire in Australia: fire regimes and climate controls in hummock grasslands[J]. Phil. Trans. R. Soc. B, 2016, 371: 20150343.
- [8] FLANNIGAN M D, KRAWCHUK M A, de GROOT W J, et al. Implications of changing climate for global wildland fire[J]. International journal of wildland fire, 2009, 18(5): 483-507.
- [9] 王广玉. 甘肃省低温雨雪冰冻灾害对林业造成的危害及对策[J]. 甘肃科技, 2011, 27(4): 139-140; 97.
- [10] PRICHARD S J, STEVENS-RUMANN C S, HESSBURG P F. Tamm Review: shifting global fire regimes: Lessons from re-burns and research needs[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 396: 217-233.
- [11] BELOTE R T, LARSON A J, DIETZ M S. Tree survival scales to community-level effects following mixed-severity fire in a mixed-conifer forest[J]. Forest Ecology and Management, 2015, 353: 221-231.
- [12] 田晓瑞, 舒立福, 王明玉, 等. 森林火灾与气候变化研究进展[J]. 世界林业研究, 2006, 19(5): 38-42.
- [13] GANTEAUME A, CAMIA A, JAPPIOT M, et al. A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe[J]. Environmental management, 2013, 51(3): 651-662.
- [14] 刘祖军, 刘健. 森林火灾发生时间规律探讨和趋势预测[J]. 林业勘察设计, 2007(2): 62-65.
- [15] 李剑泉, 刘世荣, 李智勇, 等. 全球变暖背景下的森林火灾防控策略[J]. 现代农业科技, 2009, 20(1): 243- 246.
- [16] IPCC, 2014. climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on Climate Change[R]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014: 151.
- [17] MOSER S C. Communicating climate change: history, challenges, process and future directions[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2010, 1(1): 31-53.
- [18] PATZ JA, FRUMKIN H, HOLLOWAY T, et al. Climate change: challenges and opportunities for global health[J]. Jama, 2014, 312(15): 1565-1580.

- [19] 胡鞍钢, 管清友. 应对全球气候变化: 中国的贡献[J]. 当代亚太, 2008(4): 7-25.
- [20] 魏书精, 胡海清, 孙龙. 气候变化对我国林火发生规律的影响[J]. 森林防火, 2011(1): 30-34.
- [21] 赵凤君, 舒立福, 田晓瑞, 等. 气候变化与森林火灾研究综述[J]. 森林防火, 2005(4): 19-21.
- [22] NICHOLLS R J, MARINOVA N, LOWE J A, et al. Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4 C world' in the twenty-first century[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2011, 369(1934): 161-181.
- [23] ZHAI P, PAN X. Trends in temperature extremes during 1951-1999 in China[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(17): 9-13.
- [24] YANG K, CHEN YY, QIN J. Some practical notes on the land surface modeling in the Tibetan Plateau[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(5): 687-701.
- [25] WANG Y, ZHOU L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L09707.
- [26] ZHAO Y, ZHANG H. Impacts of SST warming in tropical Indian Ocean on CMIP5 model-projected summer rainfall changes over Central Asia[J]. Climate Dynamics, 2016, 46(9-10): 3223-3238.
- [27] 秦大河. 秦大河: 未来100年全球将继续变暖[J]. 中国改革, 2009, 11(1): 10-12.
- [28] MAZDIYASNI O, AGHAKOUCHAK A, DAVIS S J, et al. Increasing probability of mortality during Indian heat waves[J]. Science advances, 2017, 3(6): e1700066.
- [29] ALLEN CD, MACALADY AK, CHENCHOUNI H, ET AL. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J]. Forest Ecology and Management. 2010, 259, 660-684.
- [30] PITMAN A J, NARISMA G T, MCANENEY J. The impact of climate change on the risk of forest and grassland fires in Australia[J]. climate change, 2007, 84(3): 383-401.
- [31] TRENBERTH K E. Climate change caused by human activities is happening and it already has major consequences[J]. Journal of Energy & Natural Resources Law, 2018, 36(4): 463-481.
- [32] 舒立福, 田晓瑞, 李红. 世界森林火灾状况综述[J]. 世界林业研究, 1998(6): 41-47.
- [33] 魏书精, 罗碧珍, 李小川, 等. 森林火灾导致人员伤亡的原因剖析及应对措施. 森林防火, 2019(3): 15-17.
- [34] 韩志刚, 田大伦, 张贵, 等. 气候变化对森林火灾动态的影响研究综述[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 5(1): 50-54.
- [35] 赵凤君, 王明玉, 舒立福. 气候变化对森林火灾动态的影响研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 50-54.
- [36] DREVER C R, DREVER M C, MESSIER C, ET AL. Fire and the relative roles of weather, climate and landscape characteristics in the Great Lakes-St. Lawrence forest of Canada[J]. Journal of Vegetation Science, 2008, 19(1): 57-66.
- [37] LINDNER M, MAROSCHEK M, NETHERER S, et al. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems[J]. Forest ecology and management, 2010, 259(4): 698-709.
- [38] 张艳平, 胡海清. 大兴安岭气候变化及其对森林火灾发生的影响[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(7): 29-36.
- [39] BRAVO S, KUNST C, GRAU R, et al. Fire-rainfall relationships in Argentine Chaco savannas[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(10): 1319-1323.
- [40] GOVENDER Y, CUEVAS E, STERNBERG L D S, et al. Temporal variation in stable isotopic composition of rainfall and groundwater in a tropical dry forest in the northeastern Caribbean[J]. Earth Interactions, 2013, 17(27): 1-20.
- [41] 李丽琴, 牛树奎. 中国气候变化与森林火灾发生的关系[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(22): 32-34.
- [42] 田晓瑞, 王明玉, 舒立福. 全球变化背景下的我国森林火灾发生趋势及预防对策[J]. 森林防火, 2003(3): 32-34.
- [43] 王明玉, 舒立福, 王景升, 等. 西藏东南部森林可燃物特点及气候变化对森林火灾的影响[J]. 火灾科学, 2007, 16(1): 15-20.
- [44] 胡海清, 金森. 黑龙江省森林火灾规律研究 II: 森林火灾动态与格局影响因素的分析[J]. 林业科学, 2002, 38(2): 98-102.
- [45] FLANNIGAN M D, STOCKS B J, WOTTON B M. Climate change and forest fires[J]. Science of the total environment, 2000, 262(3): 221-229.
- [46] KANE V R, LUTZ J A, CANSLER CA, et al. Water balance and topography predict fire and forest structure patterns[J]. Forest Ecology and Management, 2015, 338: 1-13.
- [47] ABATZOGLOU J T, KOLDEN C A, WILLIAMS A P, et al. Climatic influences on interannual variability in regional burn severity across western US forests[J]. International Journal of Wildland Fire, 2017, 26(4): 269-275.
- [48] HALLETT D J, HILLS L V. Holocene vegetation dynamics, fire history, lake level and climate change in the Kootenay valley, southeastern British Columbia[J]. Canada Journal of Paleolimnology, 2006, 35(2): 351-371.
- [49] FENSHAM R J, FAIRFAX R J, BUTLER D W, et al. Effects of fire and drought in a tropical eucalypt savanna colonized by

- rain forest[J]. *Journal of biogeography*, 2003, 30(9): 1405-1414.
- [50] WANG W J, HE H S, THOMPSON III F R, et al. Landscape-and regional-scale shifts in forest composition under climate change in the Central Hardwood Region of the United States [J]. *Landscape Ecology*, 2016, 31(1): 149-163.
- [51] 吴正方. 东北阔叶红松林分布区生态气候适宜性及全球气候变化影响评价[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 771-775.
- [52] 冷文芳, 贺红土, 布仁仓, 等. 中国东北落叶松属3种植物潜在分布对气候变化的敏感性分析[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 825-833.
- [53] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 内蒙古克氏针茅草原植物物候及其与气候因子关系[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1312-1322.
- [54] 徐明超, 马文婷. 干旱气候因子与森林火灾[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 603-608.
- [55] TURTOLA S, MANNINEN A M, RIKALA R, et al. Drought stress alters the concentration of wood terpenoids in scots pine and Norway spruce seedlings[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2003, 29 (9): 1981-1995.
- [56] 李兴华, 武文杰, 张存厚, 等. 气候变化对内蒙古东北部森林草原火灾的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(11): 114-119.
- [57] PRICE C, RIND D. Possible implications of global warming change on global lightning distributions and frequencies [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 10823.
- [58] LYNCH J A, HOLLIS J L, HU F S. Climatic and landscape controls of the boreal forest fire regime: Holocene records from Alaska[J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92: 477-489.
- [59] 贾松青, 姚树人, 郝凤珍. 大兴安岭林区特大森林火灾的天气形势分析[J]. *东北林业大学学报*, 1987, 15(6): 92-98.
- [60] STUART M, ANDREW L, SULLIVAN L, et al. Climate change, fuel and fire behaviour in a eucalypt forest[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(10): 3212-3223.
- [61] 谢晨, 赵萱, 王赛, 等. 气候变化对森林和林业的影响及适应性政策选择[J]. *林业经济*, 2010(6): 94-104.
- [62] 胡海清. 森林防火[M]. 北京: 经济科学出版社, 1999.
- [63] 王振师, 魏书精, 谢继红, 等. 林火燃烧环境对灭火效果的影响研究[J]. *林业与环境科学*, 2019, 35(2): 84-88.
- [64] 黄红. 贵州省森林火灾特征分析[J]. *贵州气象*, 2009, 33(S1): 62-64.
- [65] 金森, 胡海清. 黑龙江省森林火灾规律研究 I 森林火灾时空动态与分布[J]. *林业科学*, 2002, 38(1): 88-94.
- [66] 钟映霞, 周宇飞, 陈世清, 等. 基于无人机遥感的森林火烧迹地面积调查应用[J]. *林业与环境科学*, 2019, 35(2): 89-93.
- [67] 周宇飞, 曾宇, 李小川, 等. 红外热成像仪林火识别性能测评技术研究[J]. *林业与环境科学*, 2019, 35(6): 27-31.
- [68] 张思玉, 李杰. 我国夏季森林火灾的时空分布规律[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(3): 1551-1553.
- [69] 陶玉柱, 邸雪颖, 金森. 我国森林火灾发生的时空规律研究[J]. *世界林业研究*, 2013, 26(5): 75-80.
- [70] 黄真光. 武夷山森林火灾发生规律的研究[J]. *福建林业科技*, 2009, 36(3): 210-213.
- [71] 于成龙, 张欢, 杨晓强. 大兴安岭森林火灾特征分析[J]. *黑龙江气象*, 2007(4): 28-34.
- [72] 吴泽鹏, 周宇飞, 甄学宁, 等. 森林火灾地空配合扑救K-32与M-26直升机定点水囊投水可行性[J]. *林业与环境科学*, 2017, 33(2): 62-65.
- [73] LIU Z, YANG J, CHANG Y, et al. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 2041-2056.
- [74] 王明玉, 舒立福, 田晓瑞, 等. 森林火灾在空间上的波动性及其对全球变化的响应(I) [J]. *火灾科学*, 2003(3): 165-170.
- [75] 王明玉, 孙龙, 舒立福, 等. 森林火灾在空间上的波动及其区域化行为[J]. *林业科学*, 2006, 42(5): 98-103.