

北方森林林火发生驱动因子及其变化趋势研究进展*

李顺^{1,2} 吴志伟¹ 梁宇¹ 贺红士^{3,4}

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 东北师范大学, 长春 130000; 4 美国密苏里大学, 哥伦比亚 65211)

摘要: 北方森林作为气候变化最敏感的陆地生态系统之一, 近些年来随着林区气候变暖, 林火发生的数量和过火面积都呈显著的增加趋势, 因此研究北方森林林火发生驱动因子及其变化趋势对维护其生态系统的稳定具有重要意义。文中主要从北方森林林火发生的主要控制因子和将来气候变暖条件下林火发生的预测方法及变化趋势进行综述。研究结果表明, 林火的驱动因子既包括在大尺度上气候的作用, 也包含植被、地形、可燃物和人类活动等局部尺度的影响。近几年来对气候变暖下林火状况趋势预测更倾向综合考虑气候和局部控制因子的作用。对我国而言, 需要在更大的区域尺度上开展林火发生预测的研究。研究认为, 北方森林林火变化趋势及预测研究的关键问题在于如何在不同空间尺度上确立林火发生的关键控制因子以及完善现有的林火预测方法。

关键词: 北方森林, 林火发生, 林火驱动因子, 气候变化

中图分类号: S762

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2017)02-0041-05

DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2017.0019.y

A Review of Fire Controlling Factors and Their Dynamics in Boreal Forests

Li Shun^{1,2} Wu Zhiwei¹ Liang Yu¹ He Hongshi^{3,4}

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3 Northeast Normal University, Changchun 130000, China;

4 University of Missouri, Columbia 65211, USA)

Abstract: As one of the most sensitive terrestrial ecosystems to the climate change, boreal forests have evidently increased fire frequency and burned area in recent years. Therefore, it is of great significance to quality fire controlling factors and predict fire dynamics for maintaining the stability of the boreal forest ecosystem. In this study, we reviewed the major controlling factors to the fire occurrence, and the methods to predict fire occurrence and its dynamics under climate change scenarios. Previous studies showed that the large-scales fire controlling factor is climate, whereas the local-scale factors include vegetation, available fuels, topography and human activities. The recent prediction of forest fire dynamics under the global climate warming attaches more importance to the roles of climate and local-scale controlling factors. In boreal forests of China, it is essential to conduct the fire regime prediction at a larger scale. This study pointed out that the key problem of boreal forests fire regimes prediction is how to determine the key fire controlling factors in multiple scales and how to improve the existing methods of fire prediction.

Key words: boreal forest, fire occurrence, forest fire controlling factor, climate change

* 收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2017-02-10。

基金项目: 国家自然科学基金“气候变暖背景下林火干扰对中国北方森林地上碳储量的影响”(41371199); 国家自然科学基金“火干扰下森林土壤有机碳储量的区域估算研究”(31570462); 国家自然科学基金“火山喷发后的长白山森林景观历史重构”(31300404)。

作者简介: 李顺(1991-), 女, 硕士研究生, E-mail: lishun1991@foxmail.com。

通信作者: 吴志伟(1982-), 男, 副研究员, E-mail: wuzhiwei@iae.ac.cn。

北方森林主要分布在北半球中高纬度地区,是全球最大的陆地生态系统之一。在欧亚大陆,以俄罗斯地区为主要分布范围,北美地区主要分布在加拿大和阿拉斯加地区。我国北方森林(大兴安岭林区)是欧亚大陆北方针叶林的一部分,属于东西伯利亚南部落叶针叶林沿山地向南延伸的部分^[1]。

现有研究表明,在世界范围内,北方森林植被和土壤的总碳储量约为 559 PgC,相当于大气圈中 50% 的碳,高于其他森林生态系统。作为巨大的碳库,北方森林在全球碳平衡和应对气候变化中具有重要的地位。北方森林同时也是气候变化最敏感的区域之一,近些年来随着林区气候变暖,林火发生的数量呈显著的增加趋势。国内外一些学者研究表明,在北方森林集中分布的北美、俄罗斯、阿拉斯加以及中国大兴安岭,林火发生频率随气候变暖将有大幅度增加的趋势^[2-4]。变化后的林火将进一步影响北方森林的植被碳库、森林凋落物和土壤碳库及其周转,从而对森林的植被生产力、土壤碳氮循环都产生重要的影响^[5]。因此,北方森林的林火发生驱动因子及其变化趋势一直是森林生态学家和林火管理人员关注的焦点。本文拟总结近年来国内外学者对北方森林林火的研究成果,综述北方森林林火发生的主要驱动因子和未来气候变暖条件下林火发生的预测方法及变化趋势,并在此基础上探讨该领域需要解决的关键问题和未来研究展望。

1 北方森林林火发生驱动因子

林火发生是一个复杂的动态系统过程,是多种环境要素(气候-天气、植被与可燃物、地形、人类活动)在不同空间尺度下相互作用的过程。目前,国内学者对林火发生控制因子的研究主要集中在气候、可燃物、地形等方面^[24, 28, 31, 37]。林火发生驱动因素的研究不仅是探讨不同尺度下林火发生变化机理的前提,也是未来气候变暖下的林火发生趋势变化的重要依据。

1.1 植被与可燃物

植被与可燃物是林火发生的物质基础,也是林火蔓延的主要载体。森林可燃物是林中一切可以燃烧的死的和活的植物体,一般将其划分为地表可燃物、地下可燃物和树冠可燃物 3 大类^[7-8]。不同森林可燃物类型,由于在结构、理化性质等方面存在差异,所表现的林火状况也不同^[9-11]。因此,在全球气候变暖背景下,如何根据森林可燃物特性,建立其与林火

发生之间的预测关系,一直是国内外林火管理的焦点^[11-12]。

在过去二三十年里,美国和加拿大等发达国家已经建立了标准的可燃物分类体系,又称可燃物模型,综合区域的气象和地形条件,预测林火发生行为,并在林火管理中发挥了巨大作用^[13]。近几年来,国内学者在大兴安岭地区建立了可燃物模型,并模拟其潜在的林火行为^[12, 14-16]。

1.2 地形

地形是最为稳定的林火影响因子,一般在局部尺度上对林火发生产生影响,地形因子通过影响局部环境的水热状况,对林火发生天气、可燃物湿度和负荷量产生影响^[17-18]。国内外学者研究结果表明,林火发生与地形因子存在显著关系,林火发生在空间上趋向于分布在某些集中的地形区域。吴志伟等^[20]对大兴安岭呼中林区研究表明,林火主要发生在海拔 600~900 m,坡度主要为 0~10°,且阳坡过火面积明显大于阴坡。坡度和坡位直接影响可燃物湿度和热量的扩散以及林火的蔓延方向,一般情况下坡度越大火蔓延速度越快,而坡度平缓则火蔓延速度缓慢。在地形起伏较大地区,上坡位由于受上升气流影响,林火一般蔓延速度比下坡位快。阳坡由于光照相对较充足,可燃物相对干燥,因此林火发生的可能性也更大^[6]。

1.3 气候

气候因子主要在大的时空尺度下对林火产生影响^[21]。在研究大区域尺度林火空间格局上,气候因子的影响最为显著。因此,目前国内外学者对林火发生的预测也主要是基于气候与林火关联的角度进行^[22-25]。

气候对林火发生的影响通过 2 种方式进行:一是影响林火天气发生的频率,林火天气往往是森林火灾发生的决定性因子;二是影响可燃物含水率^[26]。一些研究表明,由气候导致的可燃物干燥状况变化是林火发生的直接影响因素,气候变暖背景下林区可燃物干燥状况的加剧,将会增加大面积森林火灾和地下火发生的概率^[27-28]。

1.4 人为活动

在人口密度较大的北方森林中,由于人为活动干扰明显,林火发生与人为活动存在着显著相关关系。同时人为活动也是林火预测中的不确定性因素。国外学者对人为活动与林火发生关系进行了较为系统的研究,主要包括人口密度、房屋建筑、公共基础设施

(道路、施工)、火源、林火管理政策等对林火发生的影响^[29-30]。

大兴安岭地区林火发生受人为因素影响较大,国内学者对该区林火空间分布与人为活动关系也展开了较多的研究^[19,31-33]。这些研究表明,通常在距离道路和居民区一定范围内是人类活动频繁区,林火发生概率高。吴志伟等^[34]研究也表明,大兴安岭林火发生的空间分布与当地人口密度有紧密联系,人为火发生较多的南部地区也是人口分布的密集区。在道路两侧等基础设施分布密集的地区是人为火的高发地带^[33]。

1.5 林火发生关键控制因子的确定

在不同尺度上,林火发生的控制因子有所不同。在大区域尺度上,林火状况主要受气候、植被因素的控制;在中尺度景观水平上,林火更多地受天气、可燃物和地形条件的影响;而在小尺度样地水平上,林火状况主要受微气候、立地条件及可燃物的控制^[35-36]。另一方面,由于不同森林生态系统地理环境不同,研究者采用的数据、方法不同,使得对不同地区的研究很难得出普适性结论。因此,如何确立林火发生的关键控制因子是林火研究中的一个关键问题。确立林火发生的关键因子的前提是对林火发生的各个驱动因子进行量化分析。一些国内学者利用统计模型方法对林火发生的驱动因子进行量化分析^[32-33],确定所研究地区影响林火发生的主要驱动因子。但研究的尺度多局限在景观尺度上,缺乏大区域尺度上的研究。

2 气候变化背景下北方森林林火状况预测

气候变化背景下的林火趋势预测不仅是森林防火工作的基础,同时也是预测北方森林碳储量变化的需要。目前国内外学者对气候变化下林火预测多采用统计模型方法^[41-43]。在全球气候变化背景下,北方森林的林火格局不断发生变化,整体而言林火频率和面积呈现上升趋势^[41-42]。

2.1 林火预测方法

国内外学者对未来气候变化下的林火预测大部分是基于气候与林火关系出发,主要采取的方法是:通过数理统计建立林火与气候之间的相关关系,根据两者之间的关系预测未来气候变化下的林火状况^[2,25,38-39]。对于气候变暖背景下林火发生的预测方法包括:

1) 气候模型与森林火险等级预报系统相结合。目前,广泛采用的是加拿大火险等级系统(CFFDRS)。该系统在世界各国得到普遍应用,许多国家将该系统进行本地化后形成了自己的火险天气系统,该系统在我国大兴安岭地区也具有适用性^[19]。CFFDRS 指标体系以时滞-平衡含水率为基础,将气象条件和可燃物含水率有机联系起来,通过气象条件的变化计算可燃物含水率的变化。将大气环流模型(GCMs)和区域气候模型(RCMs)等气候模型模拟的未来气候情景数据与该系统结合,可以预测未来气候变化下林火的变化趋势。

2) 气候模型与统计模型相结合的方法。通过统计模型建立林火发生与气象因子之间的时空关系,再结合气候变化数据,对未来林火发生趋势进行预测。但目前对气候变化下林火发生趋势的预测主要强调气候的影响,对地形、植被和人为活动等影响因子考虑较少。然而,目前研究表明,控制林火发生的因子不仅包括气候(天气)因子,也包含火源、植被、地形、可燃物和人类活动等因子^[38,42]。片面强调气候影响下的林火发生趋势而忽视其他因子的作用,可能会低估或高估气候变暖下的林火发生状况。尤其是人为因子干扰较大的林区,人为活动对林火发生的分布不可忽视。部分学者将除气候因子之外的其他局部控制因子(如人为活动、植被和地形)纳入到气候变化下林火发生预测中,结果表明未来气候下林火发生多集中在道路附近^[3,33]。有研究表明^[34],在大兴安岭地区,人为因子的干扰作用仅次于气候因子,地形和植被因子对林火发生分布也有显著的影响。这说明未来对气候变暖下林火状况趋势预测也更倾向于综合考虑气候和局部控制因子的作用。

2.2 林火状况预测

针对未来气候变化背景下的林火预测,国外学者已经对气候变暖下林火发生的趋势进行了系统研究。例如,在加拿大阿尔伯特北方森林的混交林区,到 21 世纪末雷击火的发生频率将增加 80%^[41]。在安大略湖地区,到 21 世纪末人为火发生频率将增加 50%^[42]。从整体上看,加拿大整个北方森林林火发生趋势是增加,但也有部分地区林火发生频率增加较少或出现负增长^[39]。对俄罗斯地区预测表明,北方森林林火发生趋势也在增长,高火险天气以平均每年 12 d 的速度增长^[43]。

国内学者对未来气候变暖下我国大兴安岭的林

火发生趋势研究表明,随着气候变暖,大兴安岭林火发生频率将增加30%~230%^[3],其中人为火发生频率将增加33%~71%,而自然引起的雷击火将增加84%~293%^[19]。严厉的防火措施使得近年来大兴安岭人为火明显减少,而自然引起的雷击火次数却在增加。目前,我国学者对林火发生预测研究主要局限于某些林区,缺乏覆盖整个大兴安岭区域的时空明晰的林火发生预测。

3 结论与讨论

1) 林火发生是一个复杂过程,是受气候、可燃物、地形、植被及人类活动等一系列控制因子相互作用形成的^[32-35]。一方面林火发生的控制因子在不同空间尺度下有所不同;另一方面,由于不同林区地理环境不同,研究者采用的数据、方法不同,使得研究很难得出普适性结论。因此,如何在一个大区域尺度上,确立时空明晰的林火发生的主要控制因子是未来林火研究中重点关注的问题。对我国林火研究工作而言,在未来气候变化下林火发生的趋势研究需要在更大的区域尺度上开展。

2) 对未来气候变化下的林火预测大部分是基于气候-林火的关系,片面强调气候影响下的林火发生趋势而忽视其他因子的作用,这可能会低估或高估气候变暖下的林火发生状况^[11]。近几年来,对气候变暖情景下林火状况趋势预测更倾向于综合考虑气候和局部控制因子的作用。相比单一的气候-林火关联方法,该方法进一步提高了对未来林火发生趋势预测的准确度。然而该方法也存在一定局限性,如在林火趋势进行长期预测时,并没有考虑到气候变化对植被分布的影响,人类活动的动态变化也无法从统计模型中反映,其预测的结果只能说明自然状态下的变化。因此,对于未来北方森林林火状况的预测,需要在现有研究基础上进一步考虑植被、可燃物和人类活动等因子动态变化的影响^[3]。

参 考 文 献

- [1]徐化成. 中国大兴安岭森林[M]. 北京: 科学出版社,1998.
- [2]WOTTONB M, NOCKC A, FLANNIGAN M D. Forest fire occurrence and climate change in Canada[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, 19(3): 253-271.
- [3]LIU Z H, 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.
- [4]孙龙,王千雪,魏书精,等. 气候变化背景下我国森林火灾灾害的响应特征及展望[J]. *灾害学*, 2014, 29(1): 12-17.
- [5]胡海清,魏书精,孙龙,等. 气候变化、火干扰与生态系统碳循环[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(1): 57-75.
- [6]赵亮,刘鹏举,周宇飞,等. 复杂地形下风场插值与林火蔓延模拟应用研究[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 12-16.
- [7]REICHR M, LUNDQUIST J E, BRAVO V A. Spatial models for estimating fuel loads in the Black Hills, South Dakota, USA[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2004, 13(1): 119-129.
- [8]ARROYO L A, PASCUAL C, MANZANERA J A. Fire models and methods to map fuel types: the role of remote sensing[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(6): 1239-1252.
- [9]BACHELET D, LENIHAN J, NEILSON R, et al. Simulating the response of natural ecosystems and their fire regimes to climatic variability in Alaska[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(9): 2244-2257.
- [10]SCHOENNAGEL T, VEBLEN T T, ROMME W H. The interaction of fire, fuels, and climate across Rocky Mountain forests[J]. *Bioscience*, 2004, 54(7): 661-676.
- [11]HU H, WEI S, SUN L. Estimation of carbon emissions due to forest fire in Daxing'an Mountains from 1965 to 2010[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(7): 629-644.
- [12]WU Z, HE H, CHANG Y, et al. Development of customized fire behavior fuel models for boreal forests of Northeastern China[J]. *Environmental Management*, 2011, 48: 1148-1157.
- [13]CAI L Y, HE H S, WU Z W, et al. Development of standard fuel models in boreal forests of Northeast China through calibration and validation[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(4): e94043. DOI: 10.1371/journal.pone.0094043.
- [14]LASAPONARA R, LANORTE A. Remotely sensed characterization of forest fuel types by using satellite ASTER data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(3): 225-234.
- [15]单龙延. 大兴安岭森林可燃物的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2003.
- [16]胡海清,张喆,吴学伟. 基于遥感的塔河林业局森林可燃物类型划分[J]. *东北林业大学学报*, 2007, 51(7): 20-26.
- [17]孙龙,鲁佳宇,魏书精,等. 森林可燃物载量估测方法研究进展[J]. *森林工程*, 2007, 23(2): 26-37.
- [18]STUEVE K, LAFON C, LSAACS R. Spatial patterns of ice storm disturbance on a forested landscape in the Appalachian Mountains[J]. *Virginia Area*, 2007, 39(1): 20-30.
- [19]WILLIAM T, LAFON C. Climatic and topographic controls on patterns of fire in the southern and central Appalachian mountains, USA[J]. *Landscape Ecology*, 2010, 26(2): 195-209.
- [20]王明玉. 气候变化背景下中国林火响应特征及趋势[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [21]吴志伟,常禹,贺红士,等. 大兴安岭呼中林区林火时空分布特征

- 分析[J]. 广东农业科学 2011(5): 189-193.
- [22] DOMINIC C, GAUTHIER S, BERGERON Y. Scale - dependent determinants of heterogeneity in fire frequency in a coniferous boreal forest of eastern Canada [J]. *Landscape Ecology*, 2007, 22(9): 1325-1339.
- [23] FLANNIGAN M, STOCKS B, TURETSKY M, et al. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circum boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(3): 549-560.
- [24] TYMSTRA C, FLANNIGAN M, ARMITAGE O, et al. Impact of climate change on area burned in Alberta's boreal forest [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16(2): 153-160.
- [25] 郭福涛,胡海清,马志海,等. 不同模型对拟合大兴安岭林火发生与气象因素关系的适用性[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 159-164.
- [26] 尚喆超. 呼中区林火发生格局及预测模型的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [27] 李华,杜军,田晓瑞. 黑龙江大兴安岭林区森林草类可燃物潜在能量研究[J]. *火灾科学* 2002(1): 49-51.
- [28] 赵凤君,舒立福,田晓瑞,等. 气候变暖背景下内蒙古大兴安岭林区森林可燃物干燥状况的变化[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 1914-1920.
- [29] CARDILLE J A, VENTURA S J, TURNER M G. Environmental and social factors influencing wildfires in the Upper Midwest, United States [J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(1): 111-127.
- [30] HAWBAKER T, VOLKER C, Stewart S R, et al. Human and biophysical influences on fire occurrence in the United States [J]. *Ecological Applications*, 2013, 23(3): 565-582.
- [31] 金森,胡海清. 黑龙江省林火规律研究: I. 林火时空动态与分布[J]. *林业科学*, 2002, 48(1): 88-94.
- [32] 刘志华,杨建,贺红士,等. 黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素[J]. *生态学报* 2011, 31(6): 1669-1677.
- [33] 郭福涛,苏漳文,王光玉,等. 我国北方针叶林人为火发生的预测模型[J]. *应用生态学报* 2015, 26(7): 2099-2106.
- [34] WU Z, HE H, YANG J, et al. Relative effects of climatic and local factors on fire occurrence in boreal forest landscapes of Northeastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 472-480.
- [35] PARISIEN M - A, MORITZ M A. Environmental controls on the distribution of wildfire at multiple spatial scales [J]. *Ecological Monographs*, 2014, 79(1): 127-154.
- [36] YANG J, HE H S, SHIFLEY S R. Spatial controls of occurrence and spread of wildfires in the Missouri Ozark highlands [J]. *Ecological Applications*, 2008, 18(5): 1212-1225.
- [37] 田晓瑞,戴兴安,王明玉,等. 北京市森林可燃物分类研究[J]. *林业科学*, 2006, 52(11): 76-80.
- [38] 秦凯伦,郭福涛,邱雪颖,等. 基于 Gamma 广义线性模型对塔河地区林火面积与主要气象驱动因子关系的分析[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 58(7): 60-64.
- [39] KRAWCHUK M A, CUMMING S G, FLANNIGAN M D. Predicted changes in fire weather suggest increases in lightning fire initiation and future area burned in the mixedwood boreal forest [J]. *Climatic Change*, 2009, 92(1/2): 83-97.
- [40] FINNEY M A. The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 211(1/2): 97-108.
- [41] KRAWCHUK M A, MORITZ M A, PARISIEN M - A, et al. Global phytogeography: the current and future distribution of wildfire [J]. *PLoS ONE*, 2009, 4(4): e5102. DOI: 10.1371/journal.pone.0005102.
- [42] WOTTON B M, MARTELL D L, LOGAN K A. Climate change and people - caused forest fire occurrence in Ontario [J]. *Climatic Change*, 2003, 60(3): 275-295.
- [43] MALEVSKY - MALEVICH S P, MOLKENTIN E K, NADYOZHINA E D, et al. An assessment of potential change in wildfire activity in the Russian boreal forest zone induced by climate warming during the twenty - first century [J]. *Climatic Change*, 2008, 86(3/4): 463-474.