

大兴安岭呼中林区林火时空分布特征分析

吴志伟^{1,2}, 常禹¹, 贺红士¹, 胡远满¹

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:根据大兴安岭呼中林区 1969—2005 年的林火统计资料, 利用 SPSS 统计软件和 ArcGIS 地理信息系统软件, 揭示了呼中林区林火发生的时空分布特征。结果表明: 1969—2005 年间呼中林区林火发生年际间波动较大, 1998 年以来林火发生次数呈明显的上升趋势; 呼中林区林火主要发生在春季和夏季, 特别是 5 月和 6 月的林火发生最为严重; 1 d 内林火发生大概可分为 4 个阶段, 其中以 15:00 左右最为严重。从林火发生的空间分布来看, 林火主要发生在呼中林区的东北方向, 以碧水和提扬山林场为最多; 林火发生次数随距离道路和河流变远而呈减少趋势; 林火主要发生在海拔 600~900 m 之间, 坡度主要为 0°~10°, 且阳坡过火面积明显大于阴坡。

关键词:林火; 时空分布; 呼中林区

中图分类号: P426.1*6

文献标识码: A

文章编号: 1004-874X(2011)05-0189-05

Analyzing the spatial and temporal distribution characteristics of forest fires in Huzhong area in the Great Xing'an Mountains

WU Zhi-Wei^{1,2}, CHANG Yu¹, HE Hong-shi¹, HU Yuan-man¹

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

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The spatial and temporal distribution characteristics of forest fires in huzhong forest area of Great Xing'an Mountain were analyzed using statistic analysis and GIS spatial analysis methods based on data of forest fire records from 1969 to 2005. Results indicated that the annual forest fires varied significantly from 1969 to 2005, and showed an evident upward trend since 1998. Forest fires mainly occurred in spring and summer, especially from May to June. The daily patterns of forest fires roughly divided into four stages, and the most serious stage was around at 15:00. The spatial distribution patterns of forest fires were obvious. Most forest fires lie in northeastern Huzhong forest area, especially in Bishui and Tiayangshan forest farms; The farther from the road and river, the less forest fires occurred; Most forest fires occurred at altitude ranging from 600 m to 900 m with slope from 0° to 10°. The total burned area on sunny slopes was significantly larger than that on shady slopes.

Key words: forest fire; spatial and temporal distribution; Huzhong forest area

林火作为森林中极为活跃的干扰因子, 对维持森林生态系统多样性和森林健康起着举足轻重的作用^[1]。掌握区域林火时空分布特征既可为该地区的森林火险等级区划和林火预报服务, 又可为研究林火在生态系统和景观中的作用提供必要的参数^[2-3]。因此, 林火时空分布特征倍受生态学家、林学家和森林管理部门的关注。

国外对于林火的相关研究已经比较成熟, 研究表明林火的蔓延、分布和影响与景观格局关系密切^[4-7]。在国内, 有代表性的研究主要是利用若干年林火发生历史记录数据, 对林火发生次数和过火面积的时空规律及其与气象因素、植被类型等的关系进行了研究, 并利用多元回归方法建立了林火发生预测模型^[8-14]。总体来看, 国内林火的研究已经取得了长足的进展, 经历了由经验性向科学性、由表面向纵深方向的转变, 但也存在一些问题, 有待进一步完善。首先, 现有的研究尺度较大^[3,15], 以林业局为单位的针对性研究较少^[16]; 其次, 现有研究大多只考虑林

火发生的年际和月际变化, 而对林火发生的时点规律关注不多^[8,14]; 再次, 林火空间分布更多是立足于行政区划分析, 对林火发生的地理环境分布研究相对较少^[17]。而这些方面的深入、系统的研究对于林火预测、灭火指挥和维持森林生态系统健康及其他大尺度的生态过程研究都非常重要。

长期以来, 大兴安岭是我国重要的林木产区, 也是我国少有的原始林区, 为国家带来了巨大的社会、经济和生态环境效益。然而, 近年来该地区的林火发生频率明显增高, 且灾难性林火发生呈上升趋势, 对森林生态系统健康和人民生命财产安全造成巨大威胁。掌握该地区的林火发生的时空特征, 显得十分必要。为此, 本研究以大兴安岭呼中林区为研究单位, 以林区 1969—2005 年间的林火历史数据及有关资料为基础, 揭示呼中林区林火发生的年、季、时点分布特征, 并探讨呼中林火发生与地理环境之间的关系, 旨在为呼中林区的林火预测和灭火指挥提供科学依据, 进而为林火相关研究提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

呼中林区位于我国大兴安岭伊勒呼里山北坡、呼玛河中上游地区, 地理坐标为东经 122°39'30"~124°21'00"、北

收稿日期: 2010-10-13

基金项目: 中科院知识创新工程重大项目(KZCX2-YW-444); 国家“973”计划项目(2009CB421100)

作者简介: 吴志伟(1982-), 男, 在读博士生, E-mail: sanbei82@163.com

通讯作者: 贺红士(1962-), 男, 博士, 研究员, E-mail: heh@iae.ac.cn

纬 51°14'40"~52°25'00"。该区属大陆性季风气候,为寒冷湿润气候区。光照充足,雨量充沛,寒冷湿润,光、热、水地域性差异明显,夏季短暂,冬季受西伯利亚蒙古高压气团影响寒冷而漫长,冰冻期长达 6 个月之久,绝对最低温度-47.5℃。地貌类型为大兴安岭北部石质中低山山地,山峦连绵起伏,山体浑圆,坡度平缓,一般在 15°以下,局部的阳坡较陡,可达到 35°以上。全区地势西南部高,东北部低。海拔在 500~1 000 m 之间,平均海拔 812 m,最高峰在南部中心地带小白山处,为 1 404.2 m,最低海拔在北部呼玛河出境处,为 420 m。

呼中林区植被在植物区系上属泛北极植物区,东西伯利亚植物区系,以西伯利亚植物区系成分为主,混有东北植物区系成分和蒙古植物区系成分。地带性植被类型为寒温性针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelini*)为单优势种。主要的针叶乔木树种有兴安落叶松、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和云杉(*Picea koraiensis*)。主要的阔叶乔木树种有白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)和钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)。偃松(*P. pumila*)分布于海拔较高的地带,构成了亚高山的特有景观和山地寒温带针叶疏林的林下灌木,其对涵养水源、保护珍稀濒危野生动植物物种具有重要作用。

1.2 数据来源与处理方法

1.2.1 数据来源 (1)呼中林区 1969—2005 年的林火统计数据,主要包括林火发生时间、扑灭时间、火点地理坐标、过火面积、火因和火灾损失等;(2)呼中行政区划图和呼中地形图。

1.2.2 数据处理 利用 Excel 和 SPSS 统计软件,按年、月和日统计呼中林区 1969—2005 年间林火发生次数和过火面积,以获取林火时间分布特征;林火空间分布特征是利用 ArcGIS 地理信息系统软件实现的,具体方法是各个起火点的地理坐标,建立起火点分布图,再与具有相同地理参考的呼中地形图等图形数据叠加分析,以获取各起火点的空间信息。为了方便分析,本研究依据林火发生的原因将呼中林区林火分为不明火源火、人为火和雷击火 3 类。

2 结果与分析

2.1 林火发生的时间变化特征

2.1.1 林火发生的年际变化特征 (1)林火发生次数年际变化。呼中林业区 1969—2005 年间共发生林火 131 次,年均发生 3.64 次。其中,雷击火 82 次,占总数的 63%,年均 2.3 次;人为火 33 次,占总数的 25%,年均 0.92 次;火源不明火 16 次,占总数的 12%,年均 0.44 次。总体来看,呼中林区林火发生年际波动很大,周期性特征不明显,且随时间发展总体上呈波动性上升趋势,尤其是 1998 年后上升趋势愈加明显。发生火灾最多年份集中在 1973 年、2002 年和 2005 年,分别为 11 次、11 次和 12 次,而 1983 年、1989 年、1991 年、1993 年、1994 年、1996 年和 1999 年则没有林火发生。其他年份除 1974 年、1987 年和 2000 年分别发生了 9 次、7 次和 8 次外,年平均发生林火 3 次。

雷击火构成了林火发生主体,与总林火发生年际波动趋势基本吻合,二者的相关系数为 0.828 ($P < 0.01$),说明呼中林区应该有针对性地加强对雷击火的防控;人为火($R=0.06, P>0.05$)则总体呈现下降趋势,尤其是 1987 年后的近 20 年间仅发生 3 次人为火,这表明 1987 年“5·6”大火以后,林区防火意识增强,人为着火得到有效控制;不明火集中发生在 1969—1973 年,之后基本没有发生,对呼中林火总体态势影响不大($R=0.249, P>0.05$)。

(2)林火发生面积年际变化。1969—2005 年间,呼中林区过火面积为 36 146.76 hm^2 ,年均过火面 1 004.08 hm^2 。总林火发生次数和过火面积的相关系数为 0.352 ($P>0.05$),二者间相关性不显著,说明单依靠林火发生次数来判断过火面积是不充分的。这可能与林火类型、发现时间、起火地点和扑救措施等密不可分。如 1987 年发生林火 7 次,过火面积为 430.73 hm^2 ,而 1986 年发生林火 3 次,过火面积达 3 810.07 hm^2 。

与林火发生次数类似,呼中林火发生面积的周期性也不明显,年际间波动亦较大。呼中林火过火面积较大的年份集中在 1970—1976 年,总过火面积为 13 255.80 hm^2 ,占总数的 37%,年均 1 893.69 hm^2 。过火面积不足 1 hm^2 的年份有 1988 年和 1989 年,分别为 0.10 hm^2 和 0.13 hm^2 。最大过火面积为 2000 年的 16 391.20 hm^2 。

从林火发生类型来看,雷击火面积为 25 957.96 hm^2 ,占总数的 72%,与总林火面积的相关系数为 0.937 ($P < 0.01$),二者呈极相关性,表明雷击火是影响呼中林区林火安全的主体;人为火面积为 2 608.46 hm^2 ,占总数的 7%,与总林火面积的相关系数为 0.074 ($P>0.05$),二者不相关;不明火源火面积为 7 580.33 hm^2 ,占总数的 21%,与总林火面积的相关系数为 0.311 ($P>0.05$),二者不相关。

2.1.2 林火发生的月际(季节)变化特征 呼中林区林火发生的季节变化规律明显,以 4~9 月为集中,共发生林火 127 次,过火面积 36 120.16 hm^2 ,分别占总发生次数和总过火面积的 97%和 99%。春季火险期(3 月初至 6 月底),共发生林火 88 次,过火面积 28 128.24 hm^2 ,分别占全部指标的 67%和 78%。这是因为呼中林区春季天气条件变化剧烈,常出现高温、低湿和大风天气,再加上春季烧荒整地,旅游人数增多等加剧了森林火险,其中以 5 月初至 6 月底为最危险期。夏季防火期(7~8 月),共发生林火 38 次,全部为雷击火。7~8 月呼中林区东南季风活跃、降雨集中,植物进入生长季,可燃物湿度大,难以引燃,故林火发生呈递减趋势。9~10 月为秋季防火期,林火发生仅 5 次,这是因为秋季植物枯死后,经较短时间即被积雪覆盖,火险程度较低。11 月至翌年 2 月底,因植物被积雪覆盖,野外火源极少,难以发生林火,故为冬季安全期。

从林火类型来看,雷击火一般发生在春、夏季(共 81 次,占总次数的 99%),秋季仅发生 1 次。这是因为春、夏季天气变化频繁,雷暴天气发生频率高,而秋季气候相对稳定,雷暴较少。雷击火发生次数高峰出现在 6 月份。人

为火发生在春季, 高峰期为 4~5 月, 共发生 23 期, 占总次数的 70%, 其他季节没有发生。不明火源发生则较为分散, 除冬季安全期外, 在各个火险期都有分布。

2.1.3 林火发生的时点变化特征 呼中林区林火发生的时点规律变化明显, 大致可分为 4 个阶段: 中午前后(10:00~16:00)林火发生次数最多, 共 93 次, 占总数的 71%; 傍晚(17:00~18:00)次之, 共 23 次, 占总数的 18%; 早晨(7:00~9:00)和上半夜(19:00~23:00)则少有发生, 共 12 次, 占总数的 9%; 而下半夜至凌晨(0:00~6:00)基本没有林火发生, 仅发生 3 次, 占总数的 2%。

过火面积最大发生在 15:00, 共过火面积 9 639.03 hm^2 , 占总数的 27%。此时林地受阳光炙烤时间长, 空气干燥, 可燃物含水量非常低, 同时又正值用火高峰期, 因此可燃物容易引燃, 也容易蔓延, 从而引燃面积大。可见, 呼中林区在日常防火工作方面, 特别要加强该时段火源的监测。晚 19:00~凌晨 7:00 过火面积最小, 单位小时过火面积仅为 20.82 hm^2 。该时段内温度低、空气湿度大, 草本落叶等富含水分, 难以引燃, 因此过火面积小。其他时段过火面积则较均匀, 单位时间约 2 626.63 hm^2 。

雷击火主要发生在 11:00~16:00, 共发生 53 次, 占总次数的 65%; 人为火则在 7:00~21:00 较为均匀分布, 除 14:00 发生 9 次外, 其他时段则为 1~4 次不等。不明火分布与雷击火基本类似, 但次数明显少于雷击火, 为 1~3 次不等。

2.2 林火发生的空间分布特征

根据 1969—2005 年间林火统计资料, 呼中林区共有 131 次林火记录, 其中没有地理坐标或者坐标不准确的记录为 11 次(约占总记录数的 8%, 占总面积的 0.65%), 因该类数据无法执行 GIS 空间分析, 故省略该数据。

2.2.1 林火发生的区域分异特征 利用地理信息系统软件 ArcGIS, 根据起火点的经纬度坐标并结合呼中林区行政区划图, 编制林火发生空间分布图(图 1)。从图 1 可以看出, 呼中林区林火发生的空间分布广泛, 但以东北方向较为集中。就行政区划来看, 1969—2005 年间碧水、提扬山林场和呼源林场发生林火次数最多, 分别为 10 次、12 次和 13 次, 过火面积分别为 5 676.07、3 895.13、4 231.60 hm^2 。其次是呼中经营所和自然保护区核心区, 分别为 8 次和 9 次, 过火面积分别为 515.89 hm^2 和 2 129.09 hm^2 , 其中保护区全是雷击火。林火发生 3 次以下的为保护区实验区、飞虎山林场和吉羊河林场, 共过火面积为 120.13 hm^2 。其他林场林火发生次数为 4~7 次不等。

2.2.2 林火发生与道路、河流距离的关系 对呼中林区林火发生地点与道路、河流的距离关系进行了缓冲区分析。首先将河流和道路按照间隔 200 m 的半径做缓冲区, 再将其分别与林火发生点进行空间叠加分析, 统计各个缓冲区半径内林火发生次数(表 1)。从表 1 可以看出, 呼中林区林火发生地点分布在距离河流和道路 1 000 m 范围内的比例很高, 分别占总数的 40%和 43%。进一步分析发现, 1969—2005 年间呼中林区共发生人为火 33 次, 其中发生在距离道路 800 m 以内的为 12 次, 占人为

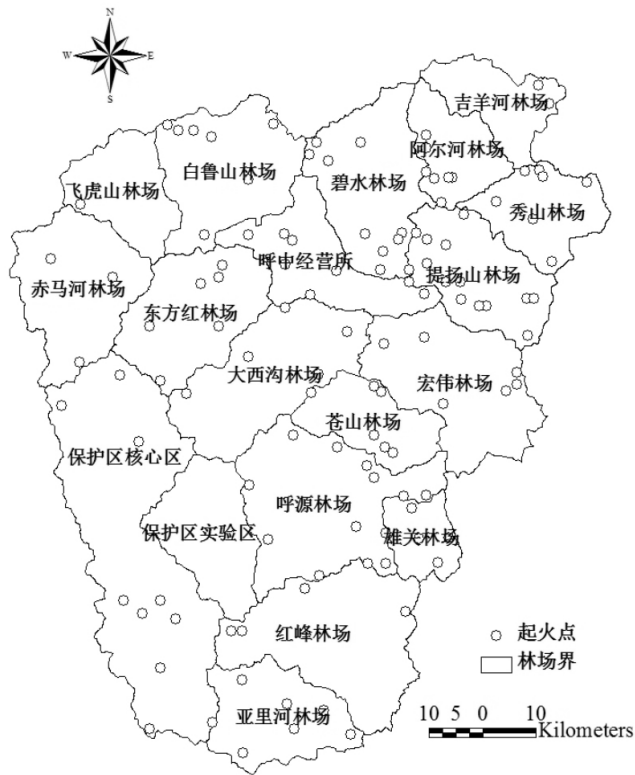


图 1 呼中林区林火发生的区域分布情况

表 1 呼中林区林火发生次数与道路、河流的距离关系表

距离(m)	与河流相交点		与道路相交点个数	
	次数	比例(%)	次数	比例(%)
0~200	13	11	11	9
200~400	13	11	12	10
400~600	12	10	15	12
600~800	13	11	9	7
800~1000	11	9	5	4
>1000	60	49	70	57

火次数的 37%, 占总林火次数的 10%; 人为火在距离河流 1 000 m 处发生 13 次, 占人为火次数的 39%, 占总林火次数的 11%。这充分表明林火发生与道路、河流的距离有密切的关系。因为旅游观光、吸烟和烧荒, 这些人为活动都可能偏离道路、河流不远而引发森林火灾, 呼中林火管理部门应该加强道路两侧近距离的林火监控。同时, 河流两侧一般水分充足、植物生长条件好, 尤其是河道两侧草本植被生长旺盛, 春、秋季节容易引燃, 因而林火发生次数多。

2.2.3 不同地形条件下的林火分布特征 利用呼中林区的 DEM 数据, 分别获取高程、坡度和坡向图, 然后将 1969—2005 年间呼中林区发生的林火火点分布与之叠加, 以分析林火在不同地形条件下的特征。

(1)海拔。本研究将林区海拔划分为 7 个梯度, 即 (<500 m)、(500~600 m)、(600~700 m)、(700~800 m)、(800~900 m)、(900~1 000 m)、(≥1 000 m)。研究结果表明, 呼中林火主要发生在 、和 海拔梯度, 分别占总林火次数的 18%、22%和 19%。林火发生次数较少的为 和 海拔梯度, 分别占总次数的 6%和 8%。和

海拔梯度发生林火次数均等,共占总次数的28%。其中,雷击火次数与海拔梯度具有很好的相关性,相关系数为0.869($P<0.01$),这主要是因为海拔高遭遇雷击概率大。人为火则分布在低海拔区域,这与前面的河流、道路距离分析结果一致。和 海拔梯度仅发生林火5次、占总人为火次数的17%,而 ~ 发生人为火19次、占总人为火的66%。过火面积最大的为 梯度,过火面积为16 351 hm^2 ,占总过火面积的46%。

(2)坡度。本研究将林区坡度划分为7个梯度,即($<5^\circ$)、($5^\circ\sim10^\circ$)、($10^\circ\sim15^\circ$)、($15^\circ\sim20^\circ$)、($20^\circ\sim25^\circ$)、($25^\circ\sim30^\circ$)、($\geq30^\circ$)。研究结果表明,呼中林区林火分为3个明显的坡度梯度级:第1级为 $<5^\circ$,共发生林火59次,过火面积12 428.35 hm^2 ,分别占总次数和总面积的59%和35%;第2级为 、和 ,林火次数分别为16、13和14次,占共过火次数的39%;第3级为 、和 ,分别发生林火6、4和8次,总过火面积为1 508.80 hm^2 。进一步分析发现,第 梯度发生林火次数虽然明显少于第 梯度,但过火面积(11 273.03 hm^2)与之相当,二者共占总林火面积的66%,这表明呼中林区林火主要发生在低坡度级上。

(3)坡向。本研究按照阴坡、阳坡和平地统计林火发生的次数和过火面积,结果表明,呼中林区林火发生次数在各个坡向分布较为均匀,阴坡、阳坡和平地分别发生35、49和36次,占总次数的29%、41%和39%。但过火面积差异却很大,阴坡、阳坡和平地分别为424.37、35 438和50.44。这表明坡向对林火发生的影响较大,一般认为阳坡日照强、温度高、蒸发快,可燃物易干燥,火势强,蔓延快,形成更大的过火面积,阴坡则相反。该分析结果与呼中林区植被类型坡向分布特征是吻合的,因为呼中林区阳坡草本植物生长更为茂盛、更易引燃,扩展速度也更快。

3 结论与讨论

依据引起火灾的原因,呼中林火大体上可以分为不明火、人为火和雷击火3类,且各类型间林火发生次数和过火面积均呈显著性差异。雷击火是呼中林火发生主体,占总发生次数和过火面积的63%和72%,与总林火发生次数($R=0.828, P<0.01$)和过火面积($R=0.937, P<0.01$)均呈显著性相关。这是因为雷击火通常发生在高山或者交通不便利的偏远地区,一旦起火很难及时发现,往往会形成大面积的火灾。因此,应当建立完善的雷击火监控机制,如在林区易发生雷击的地区设置避雷装置^[18]。人为火($R=0.06, P>0.05$; $R=0.074, P>0.05$)和不明火($R=0.249, P>0.05$; $R=0.311, P>0.05$)与总发生次数和总面积不相关,均呈明显的下降趋势,这表明林区防火意识增强,人为火得到有效的控制。本结果与金森等^[15]和郭福涛等^[16]的研究结果均不一致,这在一定程度上表明林火研究不仅要考虑尺度效应,还要分析区域环境特点。

呼中林区林火发生年际波动很大、周期性特征并不明显,但随时间发展呈上升趋势,尤其是1998年后上升趋势

越发明显,该特征与许多研究结果^[9,19]类似。这在一定程度上反映了林火发生对气候变化的响应,因为受全球气候变暖影响,进入20世纪80、90年代以来,全球范围内的森林火灾有上升的趋势^[20]。就呼中林火发生的季节变化来看,春季是林火高发期,夏季林火发生可能性也很大,秋季林火发生并不明显。这一研究结果表明呼中林区的林火管理不能简单套用黑龙江省普遍实行的“春、秋季为防火期,夏、冬为安全期”的防火模式,夏季森林防火亦不可轻视^[19]。这是因为呼中林区春季天气条件变化剧烈,常出现高温、低湿和大风天气,森林火险等级高,而夏季雷雨天气多,雷击火高发。关于大兴安岭地区林火发生的时点分布规律的研究不多,张骞等^[18]的研究表明午后是雷击火高发期。其他地区虽然环境有差异,但林火发生高峰期一般都在午后,如北京市林火发生高峰期在14:00^[14],杭州市林火发生高峰期在12:00~14:00^[21],武夷山林火发生高峰期为12:00~14:00^[22],而呼中林区的高峰期为15:00。这些研究均表明,午后林地受阳光炙烤时间长、空气干燥,可燃物含水量非常低,容易引燃,也容易蔓延,是林火监控的最重要时段。

从林火发生的空间分布来看,呼中林火发生的空间分布广泛,但以东北方向较为集中。1969—2005年间碧水、提扬山林场和呼源林场发生林火次数最多。呼中林区林火发生地点分布在距离河流和道路1 000 m范围内的比例很高,分别为40%和43%。许多研究也得到类似的结果,如聂玉藻^[23]在研究北京市房山区林火时发现林火主要发生在距离道路1 353 m内,约占总林火的61%;林火主要发生在距离河道1 726 m以内,占总林火的72.3%。这充分表明林火发生与道路、河流的距离有密切的关系,呼中林火管理部门应该加强道路、河流两侧近距离的林火监控。地形对森林火灾的影响较大,不同地形构成不同地形小气候,影响森林植物的分布,进而影响林火发生^[24]。呼中林区雷击火发生次数与海拔梯度具有很好的相关性,相关系数为0.869($P<0.01$),这主要是因为海拔高遇雷击概率大^[18],而人为火则分布在低海拔区域,这与前面的河流、道路距离分析结果一致。过火面积最大为第 梯度,占总过火面积的46%,这是因为海拔高,风速大,一旦起火蔓延速度较快^[24]。肖金香等^[17]的研究表明,庐山7次森林火灾中,只有1次坡度为 15° ,其余6次都在 50° 以上,这与一般的林火生态学原理一致,即认为林火蔓延与坡度成正相关性,即坡度越大,蔓延越快,过火面积越大。但呼中林区过火面积主要集中在 $0^\circ\sim10^\circ$,占总林火的66%,这可能与呼中林区的地形条件有关系,因为呼中山体浑圆、坡度平缓,一般坡度在 15° 以下,局部的阳坡较陡,坡度在 35° 以上。呼中林区林火发生次数在各个坡向分布较为均匀,但过火面积差异却很大,阴坡、阳坡和平地分别为424.37、35 438、50.44 hm^2 。这与肖金香等^[24]的研究一致,也与呼中林区植被类型坡向分布特征吻合,因为呼中林区阳坡草本植物生长更为茂盛,更易引燃,扩展速度也更快。

林火是一种非常复杂的自然现象,对其时空分布特

征进行系统、深入的分析,是预测林火发生的有效办法^[25]。本研究在一定程度上剖析了呼中林区的林火发生的时空规律,结果可以作为呼中林区森林防火决策管理的依据,但亦有许多工作需要进一步完善:(1)林火特征研究。本文基础数据不到40年,还需收集更多的历史数据,在详尽的数据基础上进一步探讨林火特征,如林火强度分布特征研究;(2)林火发生的影响因素研究。应该充分考虑气候、植被、人口及人类活动等诸多因素对林火发生的影响,探讨它们之间的线性或者非线性关系。

参考文献:

- [1] Taylor A H, Skinner C N. Fire history and landscape dynamics in a late-successional reserve, Klamath Mountains, California, USA[J]. Forest Ecology and Management, 1998, 111(2): 285-301.
- [2] Li C, Lan Corns G W, Yang R C. Fire frequency and size distribution under natural conditions: a new hypothesis [J]. Landscape Ecology, 1999, 14(6): 533-542.
- [3] 金森, 胡海清. 黑龙江省省林火规律研究——林火时空动态与分布[J]. 林业科学, 2002, 38(1): 88-94.
- [4] Brown P M, Kaufmann M R, Shepper W D. Long-term landscape patterns of past fire events in a montane ponderosa pine forest of central Colorado[J]. Landscape Ecology, 1999, 14(6): 513-532.
- [5] Sibold J S, Veblen T T, Gonzales M E. Spatial and temporal variation in historic fire regimes in subalpine forests across the Colorado Front Range in Rocky Mountain National Park, Colorado, USA[J]. Journal of Biogeography, 2006, 32: 631-647.
- [6] Brooks M L, Matchett J R. Spatial and temporal patterns of wildfires in the Mojave Desert, 1980-2004 [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67: 148-164.
- [7] Kharuk V I, Kasischke E S, Yakubailik O E. The spatial and temporal distribution of fires on Sakhalin Island, Russia[J]. International Journal of wildland fire, 2007, 16: 556-562.
- [8] 陈正洪, 宋正满. 神农架林火的时间变化及其成因[J]. 湖北气象, 1996(1): 36-38.
- [9] 金森. 黑龙江省省林火规律研究——大尺度水平林火与森林类型之间的关系研究[J]. 林业科学, 2002, 38(4): 171-175.
- [10] 郭福涛, 胡海清, 张金辉. 塔河地区林火时空分布格局与影响因素[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 205-208.
- [11] 胡林, 冯仲科, 聂玉藻, 等. 北京市房山区林火强度与环境因子间的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 131-134.
- [12] 张骥, 肖稳安, 庞文静, 等. 2000-2008 年大兴安岭森林雷击火特征分析与研究[J]. 农技服务, 2009, 26(10): 106-107, 136.
- [13] 于成龙, 胡海清, 魏荣华. 大兴安岭塔河林业局林火动态气象条件分析[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(8): 23-27.
- [14] 邱雪颖, 孙希国, 孙建. 大兴安岭塔河林业局林火时空动态研究[J]. 森林防火, 2008(3): 33-35.
- [15] 刘学松, 郑文达, 宋丽艳, 等. 杭州市森林火灾现状分析及预防对策[J]. 浙江林业科技, 2009, 29(2): 63-67.
- [16] 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): 211-213.
- [17] 聂玉藻. 林火时空分析方法与风险模型研建——以北京房山区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [18] 肖金香, 彭家武, 袁平成, 等. 庐山森林火灾的环境因素分析及对策[J]. 江西农业大学学报, 1999, 21(4): 592-596.
- [19] 舒立福, 张小罗, 戴兴安, 等. 林火研究综述(一)——林火预测预报[J]. 世界林业研究, 2003, 16(4): 34-37.

(上接第 181 页)

- 2000,16(2):119-123.
- [4] Grima E M, Sanchez J A, Garcia D, et al. Outdoor culture of *Isochrysis galbana* in a closed tubular photobioreactor [J]. J Biotech, 1994, 37(2): 59-66.
- [5] 康瑞娟, 蔡昭铃, 施定基. 用于微藻培养的气升式光生物反应器[J]. 化学反应工程与工艺, 2001, 17(1): 44-49.
- [6] 孙卫明, 麦康森, 孙世春. 气升式管状生物光反应器的设计与培养条件优化[J]. 齐鲁渔业, 2001, 18(3): 37-39.
- [7] 张栩, 戢涌涛, 周百成. 气升式藻类光生物反应器的应用研究[J]. 海洋科学, 2000, 24(5): 14-17.
- [8] Pirt S J, Lee Y K, Walach M R, et al. A tubular photobioreactor for photosynthetic production of biomass from CO₂: design and performance [J]. J Chem Tech Biotechnol, 1999, 33: 35-58.
- [9] Torzillo G, Carlozzi P, Pushparaj B, et al. A two-plane tubular photobioreactor for outdoor culture of spirulina [J]. Biotechnol Bioeng, 1999, 42: 891-898.
- [10] Lee Y K, Ding S Y, Low C S, et al. Design and performance of microalgae [J]. J Appl Phycol, 1995(7): 47-51.
- [11] Miyamoto K, Wable O, Benemann J R. Vertical tubular reactor for microalgae cultivation [J]. Biotechnol Lett, 1998(10): 702-708.
- [12] Acien F G, Fernandez J M, Molina Grima E, et al. Outdoor production of *Phaeodactylum tricornutum* biomass in a helical reactor [J]. Journal of Biotechnology, 2003, 103: 137-152.
- [13] Travieso. A helical tubular photobioreactor producing Spirulina in a semicontinuous mode [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2001, 47: 151-155.
- [14] Acien F G, Fernandez J M, Sanchez J A, et al. Air-lift-driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: assessment of design and performance [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56: 2721-2732.
- [15] 缪国荣, 官庆礼, 王进和, 等. 单胞藻薄膜袋封闭式培养技术的研究 [J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 89, 19(3): 53-58.
- [16] 张小葵. 浮式塑料薄膜袋培养海洋微藻的研究 [J]. 海洋科学, 2004, 28(12): 8-10.