

基于 NBR 指数分析大兴安岭呼中森林 过火区的林火烈度*

王晓莉^{1,2} 王文娟¹ 常禹^{1**} 冯玉婷^{1,3} 陈宏伟¹ 胡远满¹ 池建国⁴

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110016; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³辽宁省环境科学研究院, 沈阳 110016; ⁴内蒙古大兴安岭林业科学研究所, 内蒙古牙克石 022150)

摘要 基于 TM 影像和 3S 技术手段, 利用 NBR 指数对 1986—2010 年大兴安岭呼中林区森林过火区林火烈度进行了定量评价, 分析了林火烈度与植被类型、海拔、坡度和坡向等环境因子的关系. 结果表明: 呼中林区的林火发生次数和面积年际变化明显, 每年 6—8 月是林火的高发期, 重度火烧区占总过火面积的 84.2%. 过火区中, 兴安落叶松林占 89.9%; 海拔 1000 ~ 1500 m 区域占 68.8%; 东、南、西、北 4 个坡向的过火面积占 62.5%, 阴、阳坡过火面积差异不明显; 坡度 15 ~ 25° 的斜坡区域过火面积占 38.4%. 不同程度林火烈度的过火面积由大到小依次为重度火 > 中度火 > 轻度火 > 未过火, 其中, 重度火过火面积 > 70%, 中度火过火面积在 10% 左右, 轻度火和未过火的过火面积 < 5%. 呼中林区林火烈度以重度火为主, 对森林资源的破坏程度极大. 在大兴安岭林区的林火管理中, 应尽早开展森林可燃物处理工作, 以降低林火烈度, 保障森林生态系统的安全.

关键词 林火烈度 归一化火烧指数(NBR) 环境因子 过火面积 遥感 大兴安岭呼中林区

文章编号 1001-9332(2013)04-0967-08 **中图分类号** Q149 **文献标识码** A

Fire severity of burnt area in Huzhong forest region of Great Xing'an Mountains, Northeast China based on normalized burn ratio analysis. WANG Xiao-li^{1,2}, WANG Wen-juan¹, CHANG Yu¹, FENG Yu-ting^{1,3}, CHEN Hong-wei¹, HU Yuan-man¹, CHI Jian-guo⁴ (¹Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Liaoning Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110016, China; ⁴Institute of Forest Research in Great Xing'an Mountains, Yakeshi 022150, Inner Mongolia, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(4): 967–974.

Abstract: Based on the TM images and 3S technology, and by using normalized burn ratio (NBR), this paper quantitatively evaluated the fire severity of burnt area in Huzhong forest region of the Great Xing'an Mountains from 1986 to 2010, and analyzed the relationships of the fire severity with environmental factors such as vegetation type, elevation, slope, and aspect. In Huzhong forest region, the fire occurrence frequency and total burnt area had an obvious inter-annual change. High incidence of forest fire was from June to August, and heavily burnt area occupied 84.2% of the total burnt area. In the burnt area, larch forest accounted for 89.9%. 68.8% of burnt area located at the elevations from 1000 m to 1500 m, and 62.5% located in eastern, southern, western, and northern slopes. There was no obvious difference in the burnt area between sunny and shady slopes. The burnt area at the slope degrees 15°–25° occupied 38.4% of the total. High severity burnt area was the largest (70% of the total), followed by moderate severity burnt area (about 10%), and low severity burnt area and un-burnt area (<5%). The majority of the forest fires in Huzhong forest region were of high severity fire, which caused great damages to the forest resources. It was suggested that in the forest fire management in Great Xing'an Mountains forest region, it would be urgent to implement forest fuel treatments to reduce fire severity to guarantee the

* 国家自然科学基金项目(31070422, 41201185, 41271201)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050201)资助.

** 通讯作者. E-mail: changyu@iae.ac.cn

2012-06-28 收稿, 2013-01-26 接受.

forest ecosystem security.

Key words: forest fire severity; normalized burn ratio (NBR); environmental factor; burnt area; remote sensing; Huzhong forest region of Great Xing'an Mountains.

林火作为森林中极为活跃的干扰因子,对塑造和维护森林生态系统的结构和功能起着重要的生态作用^[1]. 林火烈度是指林火对森林生态系统(植被、土壤养分和土壤理化特性)的影响/破坏程度^[2]. 定量评价林火烈度,有助于揭示林火干扰下森林生态系统各种生态过程的发展变化和森林景观格局的形成机制^[3]. 林火干扰使森林生态系统地表植被大量死亡,在遥感影像上表现为近红外(NIR)波段的反射率降低,中近红外(SWIR)波段的反射率增加^[4-5]. 国外借助遥感手段定量评价林火烈度的研究很多,例如:Wimberly 和 Reilly^[5]基于 TM 影像和 NBR(normalized burn ratio)分析了阿巴拉契亚山脉南部地区林火烈度与生物多样性之间关系;Verbyla 等^[4]基于 TM、ETM 和 NBR 数据分析了太阳高度角和地形因素对林火烈度分级误差的影响;García-del-Rey 等^[6]基于 CBI(composite burn index)分析了加那利群岛林火烈度同火后植被更新的关系. 综合已有研究,NBR 指数对植被叶绿素和含水量变化比较敏感,是评估火烧烈度最主要的遥感方法^[7-9].

呼中林区是大兴安岭林火发生最频繁的地区^[10]. 据统计,呼中地区林火轮回期为 823 年,火源主要是雷击火,占火因总数的 60% 以上. 1986—2010 年间,呼中林区共发生林火 99 次,年均过火面积 1570 hm²,最大过火面积 410 hm². 该地区林火干扰历史较长,有关林火的研究也相应较多,如:吴志伟等^[11]对林火时空分布特征的研究;王文娟等^[1,12-13]对呼中林区可燃物类型和粗木残骸储量的研究;刘志华等^[14]对呼中林区火烧点格局分布与影响因素的研究等. 但是针对林火烈度分级评价的研究较少. 本文基于 1986—2010 年 TM 影像,借助 NBR 和 CBI 指数,建立了呼中林区过火区及其林火烈度空间分布数据库,分析林火烈度与环境因子的关系,以期为大兴安岭森林防火和林火管理提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

呼中林区地处黑龙江省大兴安岭北部(51°14'40"—52°25' N, 122°39'30"—124°21' E),总面积 770199 hm²,海拔 500 ~ 1000 m^[12,15-16]. 该地区属高纬度寒

温带地区,大陆性季风气候,光、热、水的地域性差异明显^[11,17],夏季短暂,冬季寒冷漫长,冰冻期长达半年之久. 春秋两季常出现高温、低湿和大风天气,是林火的高发期^[14,18]. 全区地势西南高、东北低. 土壤主要包括棕色针叶林土、草甸土、沼泽土、河滩森林土和石质土. 地带性植被类型为寒温性针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为单优势种. 主要针叶树种有兴安落叶松、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和云杉(*Picea koraiensis*),以及分布于高海拔地带的偃松(*Pinus pumila*);主要阔叶树种有白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、甜杨(*Populus suaveolens*)和钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)等^[19-20].

1.2 数据收集及处理

本研究所用的基础数据有:研究区 1986—2010 年林火记录数据;大兴安岭林火野外调查数据(2008—2010);研究区火后的 TM 影像(1986—2010);研究区 DEM(1:10 万)和林相图(1:10 万).

火烧记录数据来源于大兴安岭呼中林区防火办公室,包括火烧起火点的位置、火烧面积、起火原因、起火时间、灭火时间和过火区植被类型等. 海拔、坡度和坡向等地形因子由 1:10 万 DEM 在 ARCGIS 软件中的空间分析获得. 根据 1986—2010 年火点经纬度和过火面积记录,结合过火区波段亮度值分布,在 ARCGIS 9.3 中对 TM 影像进行火场目视解译,建立过火区空间分布数据库. 数据统计分析采用 Excel 2007 完成.

1.3 研究方法

遥感数据因其扫描范围广、时间分辨率高、成本低等特点而广泛应用于森林火灾监测和评估^[21-23]. 林火烈度评价方法为:选取遥感光谱指数,与野外调查获得的林火烈度调查数据相结合,进行回归分析,并建立数量方程^[7,24]. 常用的林火烈度评估指数有: NBR、dNBR、NDVI、TM4、TM7、Ratio7/4、Ratio7/5、Ratio4/5 等^[25],其中 NBR 和 dNBR 与林火烈度间有着很高的相关性,常用于林火烈度制图^[3-4,23].

1.3.1 归一化火烧指数 归一化火烧指数(normalized burn ratio, NBR)最早由 Lopez-Garcia 和 Caselles^[26]对 NDVI 指数进行修改,将 NDVI 算式中的 TM3 波段用 TM7 波段代替,即: $NDVI = (TM4 -$

$TM7)/(TM4 + TM7)$), 用于西班牙火烧迹地制图. 1999 年, 研究者正式将其命名为归一化火烧指数^[7]. NBR 的理论取值范围是 1 ~ -1, 并与林火烈度呈负相关. 为了便于分析和处理, 采用 1000 作为 NBR 计算时转化为整数的相乘系数. 本研究利用 ERDAS 9.2 软件提取了 1986—2010 年呼中林区所有火场的 NBR.

$$NBR = (Band4 - Band7) / (Band4 + Band7) \quad (1)$$

1.3.2 综合火烧指数 综合火烧指数 (composite burn index, CBI) 由 Key 和 Benson^[27] 提出, 通过野外实测调查获得. 调查方法: 在 30 m×30 m 样地中, 按垂直高度分为 5 层: A) 地表可燃物和土壤层; B) 草本、低矮灌木和 <1 m 的小树层; C) 高大灌木和 1 ~ 5 m 的乔木层; D) 5 ~ 20 m 的次林冠层; E) >20 m 的主林冠层. 在每一层中均设置 4 ~ 5 个变量, 对其目视估测, 变量的取值范围为 0 ~ 3 (0 代表没有火

烧; 1 代表轻度火烧; 2 代表中度火烧; 3 代表重度火烧), 然后对各层的估测值加以综合, 得到整个样地的 CBI 值^[25,28]. 各分层 CBI 指数计算公式:

$$CBI_i = \sum_{j=1}^n X_{ij} / n \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为第 i 层第 j 个调查因子的 CBI 得分值; n 为第 i 层中调查因子的总数.

样地总 CBI 值计算公式:

$$CBI = \sum_{i=1}^k CBI_i / k \quad (3)$$

式中: CBI 为样地综合火烧指数; CBI_i 为第 i 层的 CBI 值; k 为样地的分层数.

结合大兴安岭地区森林资源的演替历史、林龄、树种和林型等特征, 对 Key 和 Benson^[27] 提出的调查标准进行改进, 确立了适用于该地区的 CBI 野外调查内容和评价标准表 (表 1), 并据此对林火烈度分级.

表 1 综合火烧指数 (CBI) 调查内容和评价标准
Table 1 Investigated items and evaluation criterion of composite burn index (CBI)

分 层 Vertical stratum	林火烈度 Fire severity						
	未过火 Unburnt	轻 Low		中 Moderate		重 High	
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
A	枯枝落叶/直径<7.6 cm 的死可燃物消耗	无变化	50% 枯枝落叶被消耗	100% 枯枝落叶被消耗	80% 细可燃物被消耗	80% 细可燃物被消耗	
	半腐殖质	无变化	轻度烧焦	50% 消耗, 深度烧	100% 消耗		
	直径 7.6 ~ 23.3 cm 的粗可燃物	无变化	20% 消耗	40% 消耗	>60% 消耗, 深度烧焦		
	直径>20.3 cm 的大型倒木	无变化	10% 消耗	20% 消耗	>40% 消耗, 深度烧焦		
	新生裸露岩石/土壤的盖度/颜色	无变化	10% 发生改变	40% 发生改变	>80% 发生改变		
B	叶片变化率 (%)	无变化	30	80	95	100, 有枝条消耗	
	存活率 (%)	100	90	50	<20	0	
	植物定植	无变化	低	中	高-低	低-无	
	物种组成/多样性	无变化	变化小	变化中等		变化大	
C	叶片变化率 (%)	0	20	60 ~ 90	>95	有明显的枝条消耗	
	存活率 (%)	100	90	30	<15	<1	
	盖度变化率 (%)	无变化	15	70	90	100	
	物种组成/多样性	无变化	变化小	变化中等		变化大	
D	绿色林冠 (%)	100	80	40	<10	无	
	黑色林冠 (%)	无	5 ~ 20	60	>85	100%, 有枝条消耗	
	棕色林冠 (%)	无	5 ~ 20	40 ~ 80	<40 / >80	无	
	林冠死亡率 (%)	无	15	60	80	100	
	熏黑高度 (m)	无	1.5	2.8		>5	
	林木死亡率 (%)	无	15	60	80	100	
E	绿色林冠 (%)	100	95	50	<10	无	
	黑色林冠 (%)	无	5 ~ 10	50	>80	100%, 有枝条消耗	
	棕色林冠 (%)	无	5 ~ 1	30 ~ 70	<30 / >70	无	
	林冠死亡率 (%)	无	10	50	70	100	
	熏黑高度 (m)	无	1.8	4.0		>7	
	林木死亡率 (%)	无	10	50	70	100	

A: 地表可燃物和土壤层 Land surface combustible fuels and soils; B: 草本、低矮灌木和 <1 m 高的小树层 Herbs, low shrubs and trees less than 1 m tall; C: 高大灌木和 1 ~ 5 m 的乔木层 Shrubs and trees 1 to 5 m tall; D: 次林冠层 (5 ~ 15 m) Intermediate trees (5-15 m); E: 主林冠层 (>15 m) Large trees (>15 m).

1.3.3 林火烈度分级 依据林火对森林生态系统各组分损害程度的大小^[29-30],将林火烈度划分为未过火、轻度、中度和重度 4 等级. 本文根据黑龙江省森林火烧记录,选取 2008、2009、2010 年过火面积较大的火场,综合考虑植被类型、地形等因素和样地布设的合理性,选取评估了 16 个火场,设置了 85 个样地,进行野外实测,计算各样地的 CBI 指数(表 2). 综合 CBI 和火后 NBR 指数进行回归分析,建立 CBI 与 NBR 的线性方程: $NBR = -287.6 \times CBI + 584.55$ ($R^2 = 0.6275, P < 0.001$),然后根据 CBI 阈值确立林火烈度等级的 NBR 阈值(表 3)^[31],据此建立了 1986—2010 年研究区中过火区的林火烈度空间分布数据库. 借助于 ARCGIS 的空间分析模块,将林火烈度图与林相图、DEM、坡度、坡向进行空间叠加,分析林火烈度与植被类型、海拔、坡度、坡向等环境因子的相互作用.

表 2 2008—2010 年样地整体 CBI 统计
Table 2 Statistics for the whole CBI plots during 2008—2010

林火烈度 Fire severity	样点数 Plots	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 SD
轻度 Low	26	0.09	1.84	0.81	0.361
中度 Moderate	20	0.98	1.93	1.50	0.359
重度 High	34	1.54	2.91	2.23	0.389

表 3 林火烈度评估的 NBR 阈值
Table 3 NBR threshold for fire severity assessment

林火烈度 Fire severity	NBR 阈值 NBR threshold
未过火 Unburnt	>585
轻度 Low	585 ~ 252
中度 Moderate	252 ~ 53
重度 High	≤53

2 结果与分析

2.1 呼中林区林火的年际变化

由 1986—2010 年呼中林区林火记录数据可以

看出,25 年间大兴安岭呼中林区共发生林火 99 次,过火总面积为 39072.36 hm²,年均过火面积为 1562.90 hm². 期间林火主要发生于每年春秋两季的 4—10 月. 林火在 6 月和 8 月发生次数较多. 25 年时间内,呼中林区林火年际变化显著,在 1987、1992、2000、2005、2010 年发生林火次数较多,过火面积也高于其他年份,其中每 5 年左右就会出现比较强烈的林火干扰,这与以往的研究相符^[32]. 除考虑气候因子外,森林生态系统中可燃物的积累周期也是重要因子^[1],可能导致呼中地区林火次数和林火面积比较规律的年际变化.

2.2 林火烈度分析

依据 NBR 指数对 1986—2010 年呼中林区中过火区进行林火烈度分级(图 1),并计算出每个烈度等级的过火面积(表 4). 结果表明,过火区总的过火面积为 26782.11 hm². 其中,重度火烧 22552 hm²,中度火烧 2825.73 hm²,轻度火烧 1386.45 hm²,未过火 17.55 hm². 4 个林火烈度过火面积依次减小,且重度火烧面积为总过火面积的 84.2%.

2.3 林火烈度与环境因子的关系

2.3.1 林火烈度与植被 通过林火烈度图与林相图

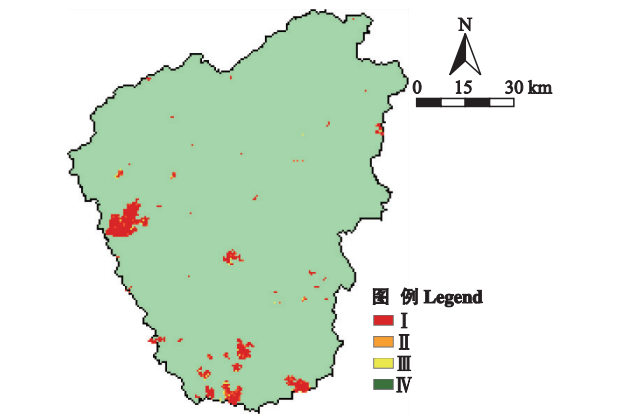


图 1 1986—2010 年林火烈度等级分布
Fig.1 Distribution map of different forest fire severity classes (1986—2010).

I: 重度 High; II: 中度 Moderate; III: 轻度 Low; IV: 未过火 Unburnt. 下同 The same below.

表 4 各年不同林火烈度等级的面积
Table 4 Area for various forest fire severity classes (hm²)

林火烈度 Fire severity	年 份 Year													
	1986	1988	1989	1992	1994	1996	1997	2000	2002	2004	2006	2007	2008	2010
I	1134.90	238.50	0	4.95	0	447.30	26.46	11313.72	349.02	554.85	1365.39	87.21	0	7030.08
II	0	4.77	0	1.80	0	0	39.87	1247.04	75.42	0	0	44.82	95.76	1316.25
III	0	2.79	0	0.18	0	0	59.85	489.96	61.74	0	0	5.58	87.84	678.51
IV	0	0	0	0	0	0	13.14	0	0.09	0	0	0	0	4.32

I: 重度 High; II: 中度 Moderate; III: 轻度 Low; IV: 未过火 Unburnt. 下同 The same below.

叠加分析,得到不同植被类型上不同林火烈度等级的过火面积(表 5)。兴安落叶松是呼中林区的代表性森林植被^[33],占整个林区面积的 75%,因而火点分布最多,过火区面积居于首位;其次为面积分布较广的白桦林;偃松林和樟子松林分布面积均<1%,因而过火面积比较小。不同烈度等级的林火在各植被类型上的分布均为重度火>中度火>轻度火>未过火,并无显著差异。林火烈度与植被类型之间是否具有显著相关性,需要大量的野外调查来验证。

2.3.2 林火烈度与坡度 坡度 5°、15°、25°是土壤侵蚀发生变化的转折点^[34],据此,将坡度分为 4 级:平坡(<5°)、缓坡(5~15°)、斜坡(15~25°)和陡坡(>25°)。不同坡度梯度上,过火区内不同林火烈度所占的面积(图 2)有显著差异,为斜坡>平坡>缓坡和陡坡。在平坡上,含柴桦(*Betula fruticosa*)的小叶樟(*Deyeuxia angustifolia*)、苔草(*Carex* spp.)草甸是主要植被,其分布面积占呼中林区总面积的 20%,且地形平坦,人类活动干扰剧烈,林火发生频率高,林火扩散速度快,过火面积也相对高于其他坡位;在斜坡上,主要分布兴安落叶松纯林,缓坡和陡坡的植被也以兴安落叶松纯林为主,但这两个坡度级本身占地面积较小,因此过火面积也较小。各坡度级,林

表 5 不同植被类型林火烈度的过火面积
Table 5 Area for various forest fire severities of burnt areas in different vegetation types (hm²)

植被类型 Vegetation type	林火烈度 Fire severity			
	I	II	III	IV
兴安落叶松林 <i>Gmelinii</i> forest	19700.55	2108.79	880.56	4.23
白桦林 <i>Platyphylla</i> forest	331.47	86.13	46.53	0.09
偃松林 <i>Pumila</i> forest	46.44	16.29	20.70	0.09
樟子松林 <i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	0.27	0	0	0
云冷杉林 <i>Spruce-fir</i> forest	104.31	30.06	31.68	0

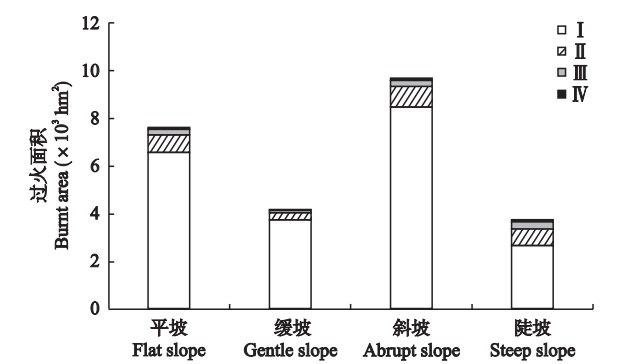


图 2 不同坡度上各林火烈度等级的过火面积
Fig. 2 Burnt area for various forest fire severities on different slopes.

火烈度过火面积均为重度火>中度火>轻度火>未过火。在平坡、缓坡和斜坡,重度火过火面积均>85%。

2.3.3 林火烈度与坡向 依据坡向值(-1~360)分级,将坡向划分为 9 类:无坡向(-1)、北(0~22.5、337.5~360)、东北(22.5~67.5)、东(67.5~112.5)、东南(112.5~157.5)、南(157.5~202.5)、西南(202.5~247.5)、西(247.5~292.5)、西北(292.5~337.5)。阳坡一般为南、西南、西、东南;阴坡为东北、东、北、西北。统计各个坡向上不同林火烈度等级的过火面积(图 3),可以看出各坡向过火面积由大到小依次为:东>北>无坡向>南>西>东北>东南>西北>西南,阴坡过火面积稍大于阳坡,差异不明显。坡向过火面积可分为两类,第 1 类为:无坡向、西、北、东、南,第 2 类为:东北、东南、西北、西南。就植被类型而言,无坡向地区所对应的植被类型为含柴桦的小叶樟、苔草草甸,其他各坡向植被类型以兴安落叶松纯林为主。各坡向,林火烈度过火面积均为重度火>中度火>轻度火>未过火,其中重度火过火面积占总面积的 80% 以上,其他烈度林火所占比重均很小。

2.3.4 林火烈度与海拔 根据中国山地划分标准^[35],将 DEM 分为 500~1000 m 和 1000~1500 m 两类。DEM 与林火烈度图层叠加分析可知,25 年间,呼中林区过火区主要分布在海拔 500~1500 m(图 4),植被类型以兴安落叶松纯林为主。海拔 0~500 m 的区域内无火烧面积,1000~1500 m 的过火面积为 17474.76 hm²,占总过火面积的 68.8%。影响植被燃烧性的因子主要为温度和降水,随海拔升高 100 m,温度会降低 0.65℃^[36]。高海拔造成林内温度低,使得地被物含水率大,不易燃烧,林火多集中于 6—8 月,高海拔地区林分中有更多的灌丛和草

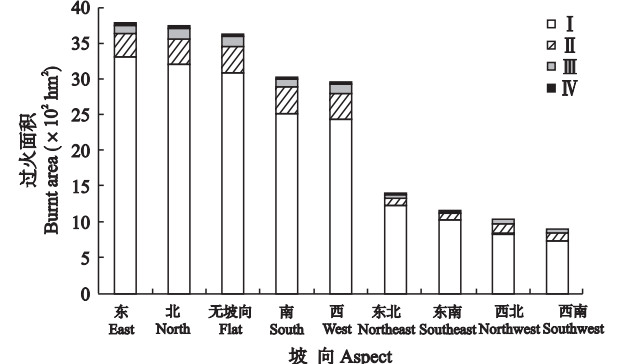


图 3 不同坡向上各林火烈度等级的过火面积
Fig. 3 Burnt area for various forest fire severities on different aspects.

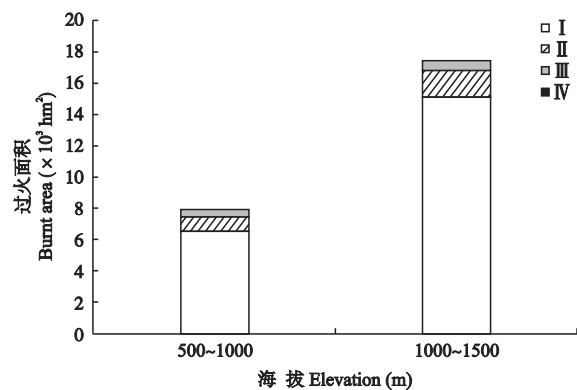


图4 不同海拔上各林火烈度等级的过火面积
Fig.4 Burnt area for various forest fire severities at different elevations.

本植物,可燃物积累比较多,高温高热的天气使得可燃物含水量很低,容易引起火灾,林火扑救难度也较大,这可能造成大面积林火. 各海拔梯度上,林火过火面积大小依次为重度火>中度火>轻度火>未过火,且在1000~1500 m,重度火和中度火的过火面积约为500~1000 m上的2倍.

3 讨 论

统计分析发现,1986—2010年间,大兴安岭呼中林区林火过火面积达39072.36 hm²,林火的季节变化明显.6—8月为林火高发期,占总发生次数的81%. 以往研究表明,采用NBR进行林火烈度分级,分类精度可达53%~81%^[37],重度火分类精度可达70.7%~89.1%^[23],但火后遥感影像上光谱移位误差会降低使用火后NBR进行林火烈度分级的精度^[4]. 因此,本文综合CBI和NBR指数进行回归分析,进而确定林火烈度分级阈值,避免了单独使用NBR进行林火烈度分级的不精确性,有效地减小了分级误差. 本文所确立的林火烈度NBR分级阈值,未来可以作为黑龙江或大兴安岭其他地区林火烈度分析与评价的参考信息,辅助林业管理部门建立大兴安岭地区林火烈度空间分布数据库,改进林火管理效率.

呼中地区林火烈度分析表明,68.6%的林火面积可以借助于NBR指数提取出来,小面积林火在TM影像上的解译难度比较大. 呼中林区林火烈度分级显著,重度火过火面积达总林火过火面积的84.2%,其他烈度等级影响区域面积较小. 综合考虑林火烈度和环境因子的相互作用,除云冷杉林外,林火面积和林火烈度同呼中地区各植被分布面积正相关,过火面积均>65%. 对坡度、坡向和海拔等立地

因子进行梯度分级,斜坡处林火发生频率最高,面积最大,林火烈度分级最显著. 吴志伟等^[11]的研究也表明,呼中地区低坡度级发生林火次数最多,但10~25°区域上过火面积>60%. 坡向和海拔因子与林火烈度的相关性不明显,吴志伟等^[11]认为原因是呼中地区山体浑圆,坡度平缓,高海拔地区各个坡向林地分布均匀,且遭遇雷击火概率大,造成林火干扰频繁发生. 过火区域内重度火烈度的干扰作用最显著,对森林生态系统的损害最严重. 林火发生概率同地表死可燃物载量正相关^[18],长期的灭火和防火措施使呼中林区地表可燃物大量积累,林业管理部门应有计划地清理森林可燃物,以降低火强度和火灾发生时释放的能量.

有关研究表明,NBR值与林火持续时间和森林生态系统生物量损耗之间相关性显著^[38]. 林火烈度分级和评价可以用来估算林火干扰带来的生物量损失,也可为估算全球碳储量提供参考. 借助高分辨率遥感影像,结合CBI和NBR数据^[22],未来可以更加广泛地研究大区域尺度上林火烈度分级、制图和评价. 但是,林火烈度同森林生态系统的内部因子(林型、林龄、可燃物积累周期)之间的作用机制,仍需要进一步探讨.

参考文献

[1] Wang W-J (王文娟), Chang Y (常禹), Liu Z-H (刘志华), et al. Ground surface dead fuel moisture content in Huzhong forest area of Great Xing'an Mountains and its environmental gradient analysis. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2009, **28**(2): 209-215 (in Chinese)

[2] Chang Y (常禹), Chen H-W (陈宏伟), Hu Y-M (胡远满), et al. Advances in the assessment of forest fire severity and its spatial heterogeneity. *Journal of Natural Disasters* (自然灾害学报), 2012, **21**(2): 28-34 (in Chinese)

[3] Hoy EE, French NHF, Turetsky MR, et al. Evaluating the potential of Landsat TM/ETM+ imagery for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, **17**: 500-514

[4] Verbyla DL, Kasischke ES, Hoy EE. Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM/ETM+ data. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, **17**: 527-534

[5] Wimberly MC, Reilly MJ. Assessment of fire severity and species diversity in the southern Appalachians using Landsat TM and ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **108**: 189-197

[6] García-del-Rey RO, Muñoz PG, Fernández-Palacios

- JM. The effect of fire severity on first-year seedling establishment in a *Pinus canariensis* forest on Tenerife, Canary Islands. *European Journal of Forest Research*, 2010, **129**: 499–508
- [7] Roy DP, Boschetti L, Trigg SN. Remote sensing of fire severity assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, **3**: 112–117
- [8] Carvalho LC, Bernardo SO, Orgaz MDM, *et al.* Forest fires mapping and monitoring of current and past forest fire activity from Meteosat Second Generation Data. *Environmental Modelling & Software*, 2010, **25**: 1909–1914
- [9] Meng Q, Meentemeyer RK. Modeling of multi-strata forest fire severity using Landsat TM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, **13**: 120–126
- [10] Chen H-W (陈宏伟), Hu Y-M (胡远满), Chang Y (常禹), *et al.* Interaction between pest and fire disturbances in Huzhong area of Great Xing'an Mountains: Long-term simulation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(3): 585–592 (in Chinese)
- [11] Wu Z-W (吴志伟), Chang Y (常禹), He H-S (贺红士), *et al.* Analyzing the spatial and temporal distribution characteristics of forest fires in Huzhong area in the Great Xing'an Mountains. *Guangdong Agricultural Sciences* (广东农业科学), 2011(5): 189–193 (in Chinese)
- [12] Wang W-J (王文娟), Chang Y (常禹), Liu Z-H (刘志华), *et al.* Characteristics of coarse woody debris in Huzhong area of Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(8): 1805–1810 (in Chinese)
- [13] Wang W-J (王文娟), Chang Y (常禹), Liu Z-H (刘志华), *et al.* Coarse woody debris loading capacity and its environmental gradient in Huzhong forest area of Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(4): 773–778 (in Chinese)
- [14] Liu Z-H (刘志华), Yang J (杨健), He H-S (贺红士), *et al.* Spatial point analysis of fire occurrence and its influence factor in Huzhong forest area of the Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(6): 1669–1677 (in Chinese)
- [15] Feng Y-T (冯玉婷), Chang Y (常禹), Hu Y-M (胡远满), *et al.* Spatial point pattern analysis on forest landscapes in Huzhong of Great Xing'an Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2012, **31**(4): 1016–1021 (in Chinese)
- [16] Chen S-B (陈树彪), Zheng Y (郑野), Li X-Y (李秀英). Research about understory economic plant resources in Huzhong forest area of the Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province, China. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design* (内蒙古林业调查设计), 2011, **34**(5): 27–30 (in Chinese)
- [17] Chen H-W (陈宏伟), Hu Y-M (胡远满), Chang Y (常禹), *et al.* Simulating long-term effects of different harvesting modes on forest fire in Huzhong Forest Region, northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2011, **33**(5): 13–20 (in Chinese)
- [18] Liu Z-H (刘志华), Chang Y (常禹), Chen H-W (陈宏伟), *et al.* Spatial pattern of land surface dead combustible fuel load in Huzhong forest area in Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 487–493 (in Chinese)
- [19] Hu Y-M (胡远满), Xu C-G (徐崇刚), Chang Y (常禹), *et al.* Application of spatially explicit landscape model (LANDIS): A case researches in Huzhong area, Mt. Daxing'anling. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(9): 1846–1857 (in Chinese)
- [20] Chang Y (常禹), Leng W-F (冷文芳), He H-S (贺红士), *et al.* Using weights of evidence to estimate the probability of forest fire occurrence: A case study in huzhong area of the Daxing'an Mountains. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2010, **46**(2): 103–109 (in Chinese)
- [21] Cui X-M (崔学明), Wang L-H (王林和), Zhou M (周梅), *et al.* Retrieval sub-pixel fire area with MODIS and ASTER data. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2008, **22**(1): 198–201 (in Chinese)
- [22] Tan X-L (覃先林), Yi H-R (易浩若). A method to identify forest fire based on MODIS data. *Fire Safety Science* (火灾科学), 2004, **13**(2): 83–91 (in Chinese)
- [23] Miller JD, Knapp EE, Key CH, *et al.* Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**: 645–656
- [24] Wagtendonk JWV, Root RR, Key CH. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM⁺ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **92**: 397–408
- [25] Epting J, Verbyla D, Sorbel B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM⁺. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **96**: 328–339
- [26] Lopez-Garcia MJ, Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 1991, **6**: 31–37

- [27] Key CH, Benson NC. Landscape assessment: Sampling and analysis methods. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station General Technical Report, RMRS-GTR-164-CD. Ogden, UT, 2006
- [28] Kasischke ES, Turetsky MR, Ottmar RD, *et al.* Evaluation of the composite burn index for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, **17**: 515–526
- [29] White JD, Ryan KC, Key CC, *et al.* Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 1996, **6**: 125–136
- [30] Brewer CK, Winne JC, Redmond RL, *et al.* Classifying and mapping wildfire severity: A comparison of methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2005, **71**: 1311–1320
- [31] Feng Y-T (冯玉婷). Spatial Heterogeneity Analysis of Forest Fire Severity in Heilongjiang Province. Master Thesis. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012 (in Chinese)
- [32] Tian X-R (田晓瑞), Liu B (刘斌). Research achievements of fire regime and fire management. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2011, **24**(1): 46–50 (in Chinese)
- [33] Wang M-Y (王明玉), Shu L-F (舒立福), Tian X-R (田晓瑞), *et al.* Landscape dynamics analysis of Daxing'an Mountains Huzhong zone under the disturbance of forest fires. *Journal of Mountain Research* (山地学报), 2004, **22**(6): 702–706 (in Chinese)
- [34] Tang G-A (汤国安), Song J (宋佳). Comparison of slope classification methods in slope mapping from DEMs. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **20**(2): 157–162 (in Chinese)
- [35] Liu W-G (刘卫国), Lü M-L (吕鸣伦). The method of mountain environment gradient analysis based on geographic informationsystem and remote sensing technology. *Geographical Research* (地理研究), 1997, **16**(3): 63–69 (in Chinese)
- [36] Wang S-H (王书涵), Zhang X-L (张晓丽), You X-X (游先祥), *et al.* Application of “3S” technique for the forest fire danger rating. *Guangdong Agricultural Sciences* (广东农业科学), 2011(23): 171–174 (in Chinese)
- [37] Roy DP, BoschettiL, Trigg SN. Remote sensing of fire severity: Assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, **3**: 112–116
- [38] Smith AMS, Wooster MJ, Drake NA, *et al.* Testing the potential of multi-spectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African Savannas. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**: 92–115

作者简介 王晓莉,女,1988年生,硕士研究生.主要从事景观生态学和 GIS 与 RS 应用研究. E-mail: wangxiaoli1000@163.com

责任编辑 李凤琴
