



生态学杂志

Chinese Journal of Ecology

ISSN 1000-4890, CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目：不同火控制政策下森林可燃物处理对大兴安岭林火情势的影响
作者：贺涵，常禹，刘志华，熊在平，布仁仓
收稿日期：2022-06-07
网络首发日期：2023-04-10
引用格式：贺涵，常禹，刘志华，熊在平，布仁仓. 不同火控制政策下森林可燃物处理对大兴安岭林火情势的影响[J/OL]. 生态学杂志.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230410.1124.008.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

不同火控制政策下森林可燃物处理对大兴安岭林火情势的影响

贺 涵^{1,2} 常 禹^{1,*} 刘志华¹ 熊在平¹ 布仁仓¹

(¹中国科学院森林生态与管理重点实验室, 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)

摘 要 随着气候变暖, 近年来灾难性森林火灾频发, 给森林资源和人们的生命财产造成重大威胁, 如何降低森林火险, 是森林管理中需要面对的热点问题。本研究利用空间直观森林景观模型 LANDIS 模拟大兴安岭森林可燃物处理对林火情势的影响。根据两种火控制政策(现行灭火和不灭火)下是否进行可燃物处理, 设计了 4 种模拟预案, 其中可燃物处理预案包含 9 种可燃物处理方案, 对应不同的可燃物处理方法(粗可燃物去除、计划火烧、粗可燃物去除+计划火烧)、处理频率(低、中、高)和处理面积(大、中、小)。通过对火烧面积、不同强度火烧面积等进行评价, 最终确定适合大兴安岭地区的森林管理方案。结果表明: 长期灭火, 使森林可燃物大量堆积, 发生高强度火灾概率增加; 在两种火控制政策下进行森林可燃物处理都可以减少高烈度林火的面积, 从而降低森林火险, 但是, 由于两种火控制政策下粗、细可燃物累积情况不同, 在自然火情景下, 频发的森林火灾导致细可燃物累积量少, 每 20 年对 10% 的面积进行粗可燃物去除即可有效降低森林火险, 但此处理方案在灭火情景下效果较差; 最终确定适合于大兴安岭地区的森林管理的方案为每 20 年对 10% 的面积进行一次粗可燃物去除+计划火烧处理, 并继续实施灭火政策。本研究可以为大兴安岭地区的林火管理提供科学依据。

关键词 灭火; 可燃物处理; LANDIS 模型; 大兴安岭; 火势

Effects of fuel treatments on the forest fire regimes under different fire control policies in the Great Xing'an Mountains. HE Han^{1,2}, CHANG Yu^{1,*}, LIU Zhihua¹, XIONG Zaiping¹, BU Rencang¹ (¹CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Climate warming has increased the frequency of catastrophic forest fires, threatening forest resources and human being's lives and properties. How to reduce forest fire risk has been a hot topic in forest management. The study used the spatially explicit forest landscape model LANDIS to simulate the effects of fuel treatment strategies on forest fire regimes in the GreatXing'an Mountains. Four simulation scenarios were designed based on whether to carry out fuel treatments or not under two fire control policies (current fire suppression and no fire suppression). The fuel treatment scenario contains nine fuel treatment options based on combinations of different treatment methods (coarse woody debris reduction, prescribed burning, coarse woody debris reduction plus prescribed burning), treatment frequency (low, medium and high) and treatment area (large, medium and small). Using burned area and the area burned by different fire intensities as evaluation criteria, a suitable forest fuel management plan was determined for Great Xing'an Mountains. The results showed that long-term fire suppression has increased fuel buildup, and the occurrence probability of high intensity forest fires. Under both

国家自然科学基金项目(31971483)和国家重点研发项目(2018YFE0207800)资助。

收稿日期: 2022-06-07 接受日期: 2023-04-04

通信作者 E-mail: changyu@iae.ac.cn

fire control policies, forest fuel treatments could reduce area burned by high intensity fires and lower forest fire risk. Under natural fire scenarios, frequent forest fires result in a lower accumulation of fine fuels, and a 10% reduction of coarse woody debris for every 20 years is sufficient to lower forest fire risk. However, such treatment scenario is less effective under current fire suppression scenarios due to accumulation of forest fuels. Our study has determined coarse woody debris reduction+prescribed burning on 10% of the area every 20 years as a suitable fuel treatment practices in Great Xing'an Mountains under current fire suppression policy. This study provided a scientific basis for forest fire management in the Great Xing'an Mountains.

Key words: fire suppression; fuel treatment; LANDIS model; the Great Xing'an Mountains; fire regime.

森林作为陆地生态系统的主体, 储存了全球植被碳库的 86%, 并且在保护区域生态环境、维持森林生态系统碳平衡和缓解气候变化等方面发挥了不可替代的作用(Hyyppä *et al.*, 2008)。但森林却时常受林火的影响, 森林火灾直接影响森林的年龄结构(Chang, 2007)、树种组成(Benali *et al.*, 2021)、森林更新(Baker *et al.*, 2018)等, 从而使森林景观格局发生改变。为了降低火灾造成的负面影响, 世界各地开始实行灭火政策(Miller, 2012), 我国也采取了灭火政策来降低森林火灾造成的危害, 灭火在一定程度上降低了火灾的发生次数, 改变了自然火的格局, 如延长火烧平均轮回期(Chang *et al.*, 2008)、影响森林演替进程(Baltzer *et al.*, 2021)等, 但也使得部分地区的野火问题变得更加严重, 如大兴安岭地区, 长期灭火导致该地区可燃物过度堆积、林火强度增高、灾害性林火发生的几率增加(Chang *et al.*, 2007)。

森林燃烧有三大要素, 分别为: 可燃物、火源和火环境(Bradstock *et al.*, 2009)。森林中所有有机物质均属于可燃物, 包括地表层、草本层、灌木层和乔木层等(Sandberg, 2001)。该要素相比于其他两个要素来说更易于人为控制, 并且进行可燃物处理可以有效降低林火的发生频率和危害程度(Fulé *et al.*, 2012; Fang *et al.*, 2015)。目前可燃物处理方法主要有粗可燃物去除(Volkova *et al.*, 2019)、计划火烧(Weston *et al.*, 2022)、梳伐(Low *et al.*, 2021)、中断可燃物(Oliveira *et al.*, 2016)等。但可燃物处理的效果会随着时间延长而弱化, 这主要取决于可燃物处理前的状态、可燃物处理本身的有效性和植被的生产力等(Reinhardt *et al.*, 2008), 总体来说, 可燃物处理的有效时间一般维持在 0~20 年左右(Martorano *et al.*, 2020; Morici *et al.*, 2021)。同时, 可燃物处理后的森林动态可能会因处理类型、强度、处理地区气候环境等的不同而有很大的差异(Collins *et al.*, 2019; Martorano *et al.*, 2020)。国内外有较多学者已经在不同地区对不同可燃物处理方法的有效性进行研究 (Brennan *et al.*, 2015), 采用的方法主要有野外实验法 (Reed *et al.*, 2020)、遥感观测法 (Weston *et al.*, 2022) 以及模型模拟法 (Oliveira *et al.*, 2016)。大兴安岭作为我国重要的木材产区和林火重灾区, 也有不少学者对大兴安岭地区森林可燃物的处理方案进行探讨(刘志华等, 2009), 但更多的是聚焦在现行灭火政策下的森林可燃物处理, 未结合不同控火政策进行比较研究。结合自然火情景下的森林可燃物处理进行比较, 可以为现行灭火政策下可燃物处理方案的选择提供科学依据。因此, 结合不同火控政策找出适合大兴安岭地区的森林可燃物处理方案是十分必要的。

借助传统野外观测实验来研究景观尺度上可燃物处理效果将会耗费大量人力、物力, 同时也受到时空尺度限制; 遥感观测法主要是针对已经发生的林火进行动态观测, 而大兴安岭地区尚未对可燃物进行统一处理, 无法通过遥感观测来获取可燃物处理前后的效果; 模型模拟不仅可以模拟不同的可燃物处理方案, 也能对可燃物处理效果进行预测, 但经验模型如 BEHAVE、CONSUME 等不能模拟植被和可燃物分解与积累的关系, FVS-FEE 等非空间模型不能模拟火的发生、扩散过程, 空间直观景观模型 LANDIS 可以模拟可燃物处理与其他景观过程的相互作用, 并且已被应用到大兴安岭地区 (Wu *et al.*, 2013)。

本研究采用空间直观森林景观模型 LANDIS 研究不同控火政策下森林可燃物处理对林火情势的影响,通过对不同火控制政策、可燃物处理方法、可燃物处理频率、可燃物处理面积进行组合来设计不同的预案,进一步从总火烧面积、不同强度火烧面积等方面对模拟 100 年内不同预案的处理效果进行评估,以反映可燃物处理对林火情势的影响,希望可以为大兴安岭森林防火工作提供一定的帮助,并进一步为应对全球气候变暖造成的林火频发问题提供解决思路。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

呼中林区(51°14'40"N—52°25'00"N, 122°39'30"E—124°21'00"E)位于大兴安岭伊勒呼里山北坡,呼玛河中上游地区。东与新林区相邻,南与松岭区和内蒙古自治区鄂伦春自治旗毗邻,北和塔河县、漠河县相连,西与自然保护区和内蒙古自治区根河市交界。呼中林区南北长 125 km,东西宽 115 km,总面积为 937244 hm²。

该地区位于大兴安岭北部高纬度寒温带地区,属于大陆性季风气候,光、热、水地域性差异明显,夏季温暖湿润,时间短暂,冬季寒冷干燥,受西伯利亚蒙古高压气团影响时间漫长。春秋两季由于受到蒙古干旱风的影响,高温、低温交替变化明显,同时伴有明显的大风天气。区内地带性植被类型为寒温带针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为主,占总植被面积的 80.6%,其次为樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和云杉(*Picea koraiensis*)。阔叶乔木树种主要有:白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、甜杨(*P. suaveolens*)、钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)等。

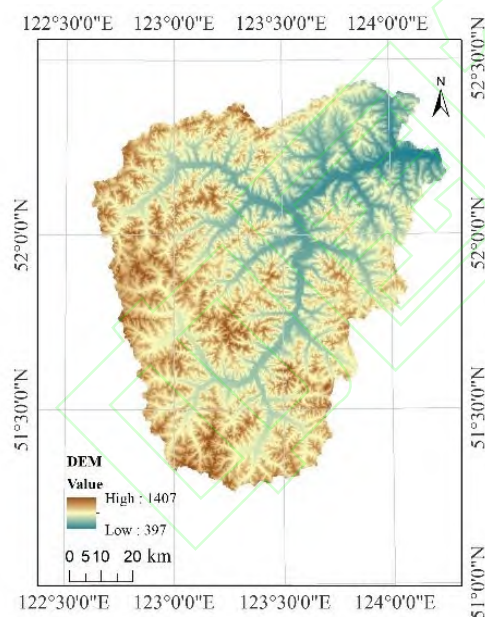


图 1 呼中林区地理位置示意图

Fig.1 The geographic location of the Huzhong forest area

1.2 研究方法

1.2.1 LANDIS 模型 本研究使用的模型为 LANDIS PRO 7.0 版本,该模型是模拟大时空尺度上(10³~10⁶)变化的空间直观景观模型,可以用于模拟森林景观演替、种子扩散、空间干扰和可燃物处理(He *et al.*, 1999)。LANDIS 模型是基于栅格数据结构,将景观看做成大小相同的像元组成的格网,每一个像元都记录着树种种类、株数和年龄信息等,并根据树种的生物属性等信息进行森林演替、干扰等变化的模拟。LANDIS 模型的输出包括火灾分布图、可燃物载量图、物种的分布图等(Mladenoff *et al.*, 1999; Mladenoff, 2004)。目前 LANDIS 模型

已经在不同地区的森林生态系统中得到广泛应用(Wu *et al.*, 2013; Luo *et al.*, 2015; Liang *et al.*, 2017)。

1.2.2 LANDIS 模型参数化 LANDIS 模型初始化输入的信息主要分为非空间参数 (DAT 文件) 和空间参数 (GIS 图层)。非空间参数包括树种生物学属性、树种建群概率、火干扰参数等。空间参数包括树种组成图、立地类型图、管理区图等。进行参数化的数据来源为: 2000 年 TM 遥感影像两景 (WRS: P/R: 120/24 和 121/24)、地形图 (1:50000)、1990 年林相图以及大兴安岭呼中林区 1990—2000 年间的火烧记录, 本研究将利用以上数据对 LANDIS 模型的演替模块、火模块、可燃物模块进行参数初始化, 主要参数如下:

(1) 物种生活史特征参数和森林构成图

模型所需要的主要树种生活史特征参数包括: 寿命、成熟年龄、耐阴等级、耐火等级、碳系数等(Mladenoff *et al.*, 1999)。研究区的 8 个物种的生活史特征均从文献(刘志华等, 2009; 罗旭等, 2016)和实地调查研究获得, 主要参数见表 1。

森林构成图的每一个像元包含物种以及物种的年龄信息, 本文采用的是基于小班的随机赋值法, 徐崇刚(2006)等针对小班赋值法进行了不确定性研究, 结果表明该方法在景观尺度上保持相对稳定。因为本文研究主要是考虑景观水平上的林火情势, 所以可以使用此方法用于 LANDIS 模型的参数化。

表 1 呼中林业局物种生活史特征参数

Table 1 Species life-history attributes in Huzhong forest area

物种 Species	寿命(a) Longevity	成熟 年龄 Maturity age	耐阴性 Shade tolerance	耐火性 Fire tolerance	有效传播 距离(m) Effective distance	最大传播 距离(m) Maximum distance	萌发率 Reproduction probability	最小萌发年龄(a) Minimum age of reproduction
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	300	20	3	3	150	300	0	0
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	250	40	1	1	100	200	0	0
云杉 <i>Picea koraiensis</i>	300	30	4	2	100	150	0	0
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	150	15	1	2	-1	-1	1	40
山杨 <i>Populus davidiana</i>	180	30	1	3	-1	-1	1	40
甜杨 <i>Populus suaveolens</i>	150	25	1	4	-1	-1	1	40
钻天柳 <i>Chosenia arbutifolia</i>	250	30	2	2	-1	-1	0.9	30
偃松 <i>Pinus pumila</i>	250	30	3	1	90	100	0	0

注: -1: 无限距离; 耐阴性和耐火性: 5 为耐受性最强等级。

Note: -1 represents unlimited effective seeding range; shade tolerance and fire tolerance: 5 is the highest tolerance level.

(2) 土地类型图

LANDIS 模型将异质性的景观划分成了相对均质的土地类型单元,划分后的同一土地类型具有相同的环境条件,因此相同土地类型内的同一物种建群系数相对一致。由于研究区地形复杂,地表植被覆盖情况不同,为了更好地对不同区域进行模拟,本研究将研究区划分为 6 种土地类型,分别为:非林地、水域、阶地、南坡、北坡和亚高山区 (>1000 m)。非林地、水域根据呼中林区 1990 年林相图获得,南坡、北坡从 DEM 获取坡向进行划分,进一步根据 DEM 获取海拔来确定亚高山地区和阶地。其中,林地和水域占整个研究区面积的 0.82%,阶地、南坡、北坡和亚高山地区则分别占 4.95%、38.41%、45.19%和 10.61%。同时,为了进一步使物种/年龄分布图相匹配,并降低模拟负荷,本研究利用 ArcGIS 将整个研究区重采样为 90 m×90 m 分辨率,最终输出一副 1480 行×1274 列的土地类型分布图(图 2)。

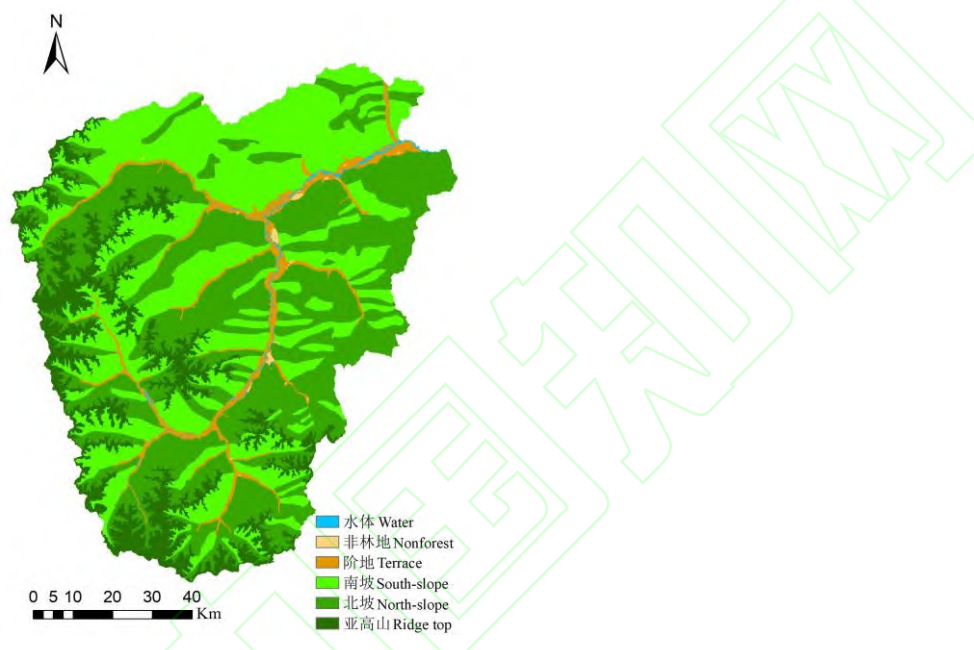


图 2 呼中林区土地类型示意图

Fig.2 Land types of the Huzhong forest area

(3) 林火数据

火干扰是呼中林区最频繁的干扰过程,风倒和病虫害在呼中林区并不严重,所以研究只进行火干扰的模拟。LANDIS 模型在模拟火干扰时假设每一种土地类型区具有相同的火干扰格局(如火烧轮回期、平均火烧面积等),进而模拟火干扰的发生、传播和蔓延过程。通过对大兴安岭呼中林业局 1990—2000 年间的火烧记录进行统计计算,得到每种土地类型区的平均火烧轮回期。

1.2.3 预案设计及相关参数确定

(1) 预案设计

本研究的火控制政策主要包括两种,一种是 1950 年以前自然火格局(historic fire regime, NFS),代表不灭火方案;另一种为 1950 年后实施的灭火政策(current fire suppression, CFS),代表现行灭火方案。

可燃物处理方法包括粗可燃物去除(coarse woody debris reduction)、计划火烧(prescribed burning)、粗可燃物去除+计划火烧(coarse woody debris reduction plus prescribed burning) 3 种。为了更准确地找出合适的可燃物处理预案,结合可燃物处理效果维持的时间以及可燃物

处理的成本，最终设置低（20年）、中（10年）、高（5年）3种可燃物处理频率和大（10%）、中（5%）、小（2%）3种可燃物处理面积，进而确定本文所模拟的9种森林可燃物处理方案（表3）。

综上，本研究有4种主要预案（表2），B和C预案中分别包含9种不同的可燃物处理方案（表3）。为了减小由于模型不确定性因素所导致的误差，不同的方案选择不同随机种子数各模拟10次并取平均值。

表2 四种可燃物处理预案说明

Table 2 Descriptions of the four fuel treatment scenarios

预案名称 Scenarios	说明 Descriptions
A	无可燃物处理（no fuel treatment, NFT）+现行灭火方案（current fire suppression, CFS）
B	可燃物处理（fuel treatment, FT）+现行灭火方案（CFS）
C	可燃物处理（FT）+不灭火方案（historic fire regime, NFS）
D	无可燃物处理（NFT）+不灭火方案（NFS）

表3 九种可燃物处理方案说明

Table 3 Details of the nine fuel treatment measures

方案名称 Measures	处理方法 Treatment methods	处理面积 Treatment area	处理频率（a） Treatment frequency
11	粗可燃物去除	小（2%）	高（5）
12	Coarse woody	中（6%）	中（10）
13	debris reduction	大（10%）	低（20）
21	计划火烧 Prescribed burning	小（2%）	高（5）
22		中（6%）	中（10）
23		大（10%）	低（20）
31	粗可燃物去除+计划火烧	小（2%）	高（5）
32	Coarse woody debris reduction	中（6%）	中（10）
33	plus Prescribed burning	大（10%）	低（20）

(2) 模拟预案参数

LANDIS 模拟可燃物处理是按照高火险区域优先处理的原则，在设定的处理周期内按照设定的处理面积进行可燃物处理。粗可燃物是任何直径 ≥ 0.64 cm 的枯枝、倒木及枯立木等，细燃料主要包括树叶凋落物和直径 < 0.64 cm 的小枝、树叶以及杂草等。模型根据物种-年龄曲线、林分年龄、干扰历史等信息计算得到每个像元中粗、细可燃物载量，进一步划分为5个可燃物等级：1级（ $< 0.5 \text{ kg m}^{-2}$ ）、2级（ $0.5 \sim 1.0 \text{ kg m}^{-2}$ ）、3级（ $1.0 \sim 1.5 \text{ kg m}^{-2}$ ）、4级（ $1.5 \sim 2.0 \text{ kg m}^{-2}$ ）、5级（ $> 2.0 \text{ kg m}^{-2}$ ）。粗可燃物去除是将像元上 ≤ 3 级的粗可燃物全部去除，同时将4、5级的粗可燃物降低1、2级，而不处理细可燃物。计划火烧对粗可燃物不做处理，而是烧除所有的细可燃物。粗可燃物去除+计划火烧处理对于 ≤ 3 级的粗可燃全部只降低一级，而 ≥ 3 级的粗可燃物将其降低到1级，细可燃物则全部烧除。具体参数见表4。

表4 可燃物处理参数

Table 4 Fuel treatment parameters

处理方法	类型	等级
------	----	----

Treatment methods	Type	Grade
不处理	细可燃物 Fine fuel	0 1 2 3 4 5
No treatment	粗可燃物 Coarse fuel	0 1 2 3 4 5
粗可燃物去除	细可燃物 Fine fuel	1 2 3 4 5 5
Coarse woody debris reduction	粗可燃物 Coarse fuel	0 0 1 2 3 3
计划火烧	细可燃物 Fine fuel	0 0 0 0 0 0
Prescribed burning	粗可燃物 Coarse fuel	0 1 2 3 4 5
粗可燃物去除+计划火烧	细可燃物 Fine fuel	0 0 0 0 0 0
Coarse woody debris reduction plus Prescribed burning	粗可燃物 Coarse fuel	0 0 1 1 1 1

火干扰参数是通过呼中林业局的 1990—2000 年间的火烧记录以及相关文献进行确定，进而不断地调整参数，使模拟结果和参数输入基本一致，具体参数见表 5。火干扰模拟的火烧强度是由可燃物的数量和质量决定，本研究开启可燃物模块，由栅格内的粗、细可燃物等级确定最终火烧强度，不同火烧强度表现为火烧区域内物种年龄队列的死亡率不同。

1.2.4 模拟方案验证 使用 Wilcoxon 秩检验在 95% 的置信区间下对参数设置和模拟的平均火烧轮回期 (MRI) 进行检验，发现并没有明显差异 (FS, $P=0.875$; NFS, $P=0.771$) (表 5)。

表 5 不同土地类型上 2 种火灾预案的平均火烧轮回期参数设置与模拟

Table 5 Statistical test for mean fire return intervals between inferred and simulated MRI for the current fire suppression (CFS) and no fire regime (NFS) scenarios

土地类型 Land type	灭火情景 MRI under the CFS Scenario		自然火情景 MRI under the NFS Scenario	
	参数设置 Inferred	模拟结果 Simulated	参数设置 Inferred	模拟结果 Simulated
	阶地 Terrace	1500	2031	500
南坡 South slope	600	596	160	164
北坡 North slope	500	513	150	152
亚高山区 Ridge top	400	382	140	150
Wilcoxon 符号秩检验 Wilcoxon signed ranks test	$P=0.875$		$P=0.771$	

1.2.5 数据分析 本研究采用 SPSS 22.0 中的单因素方差分析 (one-way ANOVA) 对不同处理方案下的火烧次数、平均火烧强度、总火烧面积、低强度火烧面积 (1、2 级火)、中强度火烧面积 (3 级火) 以及高强度火烧面积 (4、5 级火) 的差异性进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 灭火的负效应

通过比较预案 A 和预案 D 的模拟结果，可以得到现行灭火政策对林火干扰情势的影响，分别从以下 4 个方面进行说明。

2.1.1 总火烧面积和火灾强度 模拟结果表明两种控火政策下的总火烧面积有明显差异 ($df=1$, $F=350.316$, $P<0.001$)，火烧强度也存在明显差异 ($df=1$, $F=11.022$, $P=0.004$)。两种控火政策下不同火烧面积和火烧强度动态变化表明，灭火在减少总火烧面积的同时提高了

平均火烧强度（图3）。预案A在100年内平均每10年的火烧面积维持在1.8%~2.4%，火烧强度从第10年的2.5逐渐上升到第100年时的3.2（图3）。预案D在100年内平均每10年的火烧面积维持在5.24%~7.11%，火烧强度从第10年的2.5逐渐上升到第100年时的2.7（图3）。灭火降低了总火烧面积，但平均火烧强度增高。

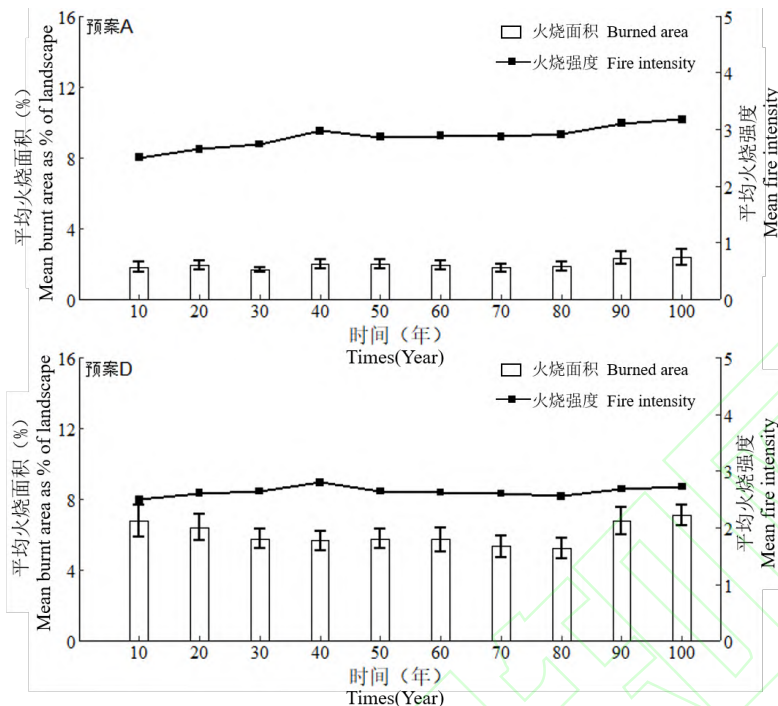


图3 A和D模拟预案下平均火烧面积百分比及火烧强度

Fig.3 Percentage of total burned area per decade and mean fire intensity under simulation scenario A and D

2.1.2 最大火烧面积 实施灭火政策可以显著抑制野火蔓延，降低最大火烧面积 ($df=1$, $F=46.756$, $P<0.001$)。灭火情景下，最大火烧面积呈曲折上升的趋势，从第10年的924.29 hm^2 ，到模拟100年时最大火烧面积约为2814.99 hm^2 （图4）。但在自然火情景下，最大火烧面积整体较为平均，维持在3000 hm^2 左右（图4）。

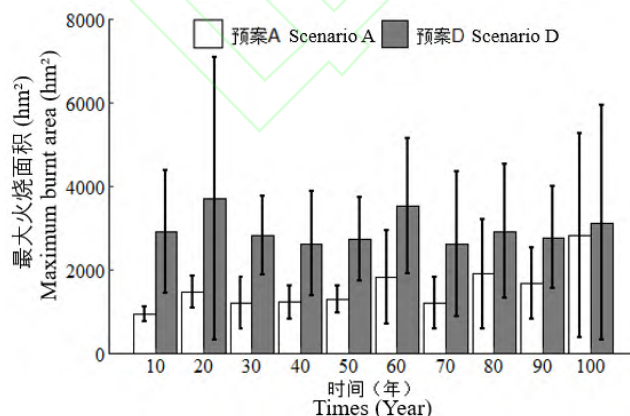


图4 A和D模拟预案下最大火烧面积

Fig.4 Largest fire size under simulation scenario A and D

2.1.3 不同强度的火烧面积 在不同的预案下，不同火烧强度的火烧面积比例也不相同（图5）。在自然火情景下，高强度火的平均火烧面积占总火烧面积的比例基本稳定，整体在

10.7%~23.6%浮动，只有在模拟的第 40、50、100 年时占到总火烧面积的 20%以上（图 5）。但是在灭火情景下，除第 10、20、30 年，其余年份高强度火占总火烧面积的比例均大于 20%，并且所占比例不断上升，第 100 年时达到 33.2%。可以看出，灭火虽然有效降低了总火烧面积，但是并不能有效降低中、高强度火发生的可能。

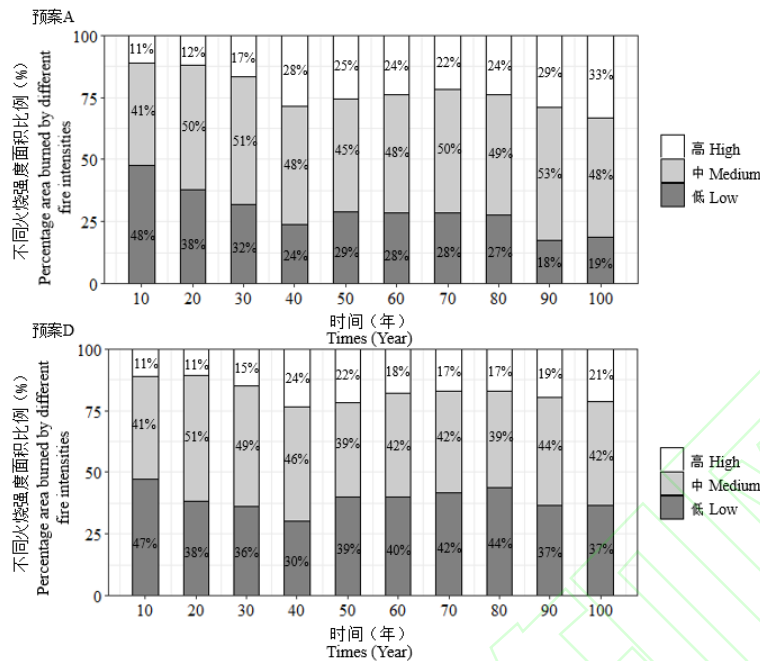


图 5 A 和 D 模拟预案下不同强度火烧面积百分比

Fig.5 Percentage area burned by different fire intensities under simulation scenario A and D

注：高强度：4、5 级火；中强度：3 级火；低强度：1、2 级火。

Note: High-intensity: class 4 and class 5; medium-intensity: class 3; low-intensity: class 1 and class 2.

2.1.4 可燃物累积 灭火使得平均细可燃物等级 ($df=1, F=9.255, P=0.007$) 和平均粗可燃物等级 ($df=1, F=14.669, P=0.001$) 显著高于自然火情景。随着模拟年份的增加，两种预案下的平均细可燃物等级均呈上升趋势，预案 A 的平均细可燃物等级上升趋势更加明显，从模拟第 10 年的 2.17 到模拟第 100 年时的 2.68；预案 D 的平均细可燃物等级虽然整体也保持上升，但上升趋势较缓，从第 10 年的 2.01 到第 100 年时的 2.30（图 6）。针对粗可燃物的累积情况，预案 A 的平均粗可燃物等级呈上升态势，从第 10 年的 3.23 到模拟第 100 年时的 3.79，而预案 D 的平均粗可燃等级维持在 3.30 左右（图 6）。灭火虽降低了火灾发生的频率，但造成粗可燃物累积，进而导致平均火烧强度增加。

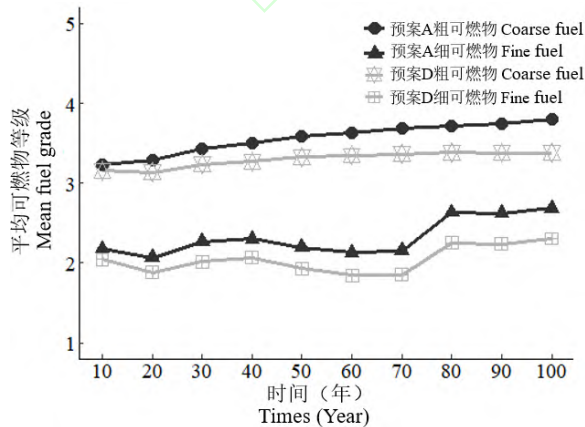


图 6 A 和 D 模拟预案下平均可燃物等级

Fig.6 Mean fuel grade under simulation scenario A and D

2.2 自然火情景下的可燃物处理效果

通过比较预案 C 和预案 D 的模拟结果,可以得到自然火情景下可燃物处理对林火干扰情势的影响,分别从以下 2 个方面进行说明。

2.2.1 总火烧面积 模拟结果表明在自然火情景下,不同可燃物处理方案的每 10 年平均火烧面积差异不显著 ($P=0.213$),但不进行可燃物处理和进行粗可燃物去除+计划火烧之间存在显著差异 ($P=0.012$)。同时,粗可燃物去除 ($P=0.956$)、计划火烧 ($P=0.421$) 两种方法下不同的处理面积和处理频率之间差异不显著,但粗可燃物去除+计划火烧方法下不同的处理面积和处理频率之间存在显著差异 ($P=0.049$)。例如,不进行可燃物处理的 D 预案的平均火烧面积占研究区面积的 6.09%, C11、C12、C13 为 6.03%、6.00%、6.02%, C21、C22、C23 为 6.08%、5.99%、5.99%, C31、C32、C33 为 6.03%、5.91%、5.91%。(表 6)。

表 6 C 和 D 预案下不同可燃物处理方案各火烧强度每 10 年平均火烧面积百分比

Table 6 Percentage area burned by different fire intensities for each treatment measure per decade under simulation scenario C and D

预案 Scenarios	总火烧面积 (%) Total burned area	低强度火烧面积 (%) Low-intensity burned area	中强度火烧面积 (%) Medium-intensity burned area	高强度火烧面积 (%) High-intensity burned area
D	6.09	2.38	2.66	1.06
C11	6.03	2.45	2.56	1.02
C12	6.00	2.63	2.41	0.96
C13	6.02	2.86	2.26	0.91
C21	6.08	2.36	2.66	1.06
C22	5.99	2.34	2.62	1.03
C23	5.99	2.31	2.64	1.04
C31	6.03	2.44	2.57	1.02
C32	5.91	2.58	2.38	0.94
C33	5.91	2.76	2.25	0.89

注: 高强度: 4、5 级火; 中强度: 3 级火; 低强度: 1、2 级火。

Note: High-intensity: class 4 and class 5; medium-intensity: class 3; low-intensity: class 1 and class 2.

2.2.2 不同强度下的火烧面积 模拟结果表明,在自然火情景下,不同可燃物处理方案下低强度火烧面积呈现显著差异 ($P=0.003$)。不进行可燃物处理和进行粗可燃物去除存在显著差异 ($P=0.017$),但不进行可燃物处理和计划火烧 ($P=0.063$) 以及粗可燃物去除+计划火烧 ($P=0.079$) 之间差异均不显著。粗可燃物去除方法下的不同处理频率、不同处理面积之间差异显著 ($P=0.034$),随着可燃物处理面积的增大和处理频率的降低,低强度平均火烧面积逐渐从 2.45% 增加到 2.86%,方案 C13 相对于不进行可燃物处理情况低强度火烧面积增加了 0.48% (表 6); 中强度火烧面积在不同可燃物处理方案间差异不明显 ($P=0.077$); 高强度火烧面积在不同可燃物处理方案间差异也不显著 ($P=0.917$)。

2.3 现行灭火情景下的可燃物处理效果

通过比较预案 B 和预案 A 的模拟结果,可以得到现行灭火情景下可燃物处理对林火干扰情势的影响,分别从以下 2 个方面进行说明。

2.3.1 总火烧面积 模拟结果表明在灭火情景下,不同可燃物处理方案间每 10 年平均火烧面积差异不显著 ($P=0.429$),不实施可燃物处理分别和 3 种可燃物处理方法之间差异不显著。同时,3 种可燃物处理方法下的不同处理频率、处理面积之间差异也不显著。例如,在不进行可燃物处理的方案 A 中,平均每 10 年火烧面积占总研究区的 1.97%,在 B11 方案下,总

面积虽降低到了 1.96%，但并不明显（表 7）。

表 7 A 和 B 预案下不同可燃物处理方案各火烧强度每 10 年平均火烧面积百分比

Table 7 Percentage area burned by different fire intensities for each treatment measure per decade under simulation scenario A and B

预案 Scenarios	总火烧面积 (%) Total burned area	低强度火烧面积 (%) Low-intensity burned area	中强度火烧面积 (%) Medium-intensity burned area	高强度火烧面积 (%) High-intensity burned area
A	1.97	0.46	0.96	0.56
B11	1.96	0.59	0.93	0.44
B12	2.00	0.64	0.91	0.45
B13	1.97	0.70	0.84	0.43
B21	1.99	0.58	0.96	0.45
B22	2.00	0.58	0.98	0.44
B23	2.00	0.57	0.97	0.45
B31	1.99	0.60	0.94	0.45
B32	1.98	0.62	0.89	0.45
B33	1.91	0.67	0.82	0.42

注：高强度：4、5 级火；中强度：3 级火；低强度：1、2 级火。

Note: High-intensity: class 4 and class 5; medium-intensity: class 3; low-intensity: class 1 and class 2.

2.3.2 不同强度下火烧面积 模拟结果表明，在灭火情景下低强度火烧面积在不同的可燃物处理方案间表现出显著的差异 ($P<0.001$)；粗可燃物处理、粗可燃物去除+计划火烧各自内部的 3 种方案之间也存在显著差异 ($P<0.001$)。例如，与预案 A 相比，方案 B13 和方案 B33 的低强度平均火烧面积方面显著增加，分别从 0.46% 增加到 0.70% 和 0.67%（表 7），说明低处理频率、大处理面积的粗可燃物去除和粗可燃物去除+计划火烧均可以明显增加低强度火烧面积；中强度火烧面积在不同的可燃物处理方案间也存在显著差异 ($P<0.001$)；方案 B13 和方案 B33 分别约降低了 0.12% 和 0.14%（表 7）；高强度火烧面积在不同可燃物处理方案间仍有显著差异 ($P<0.001$)；高强度火烧面积在没有进行可燃物处理时为 0.56%（表 7），9 种可燃物处理方案都可以降低高强度火烧面积，方案 B33 降低最为显著。因此，低处理频率、大处理面积的粗可燃物去除+计划火烧最能显著降低高强度火烧面积。

3 讨论

森林地被可燃物是燃烧的最基本条件(Bradstock *et al.*, 2009)，进行森林可燃物处理可以有效降低林火的频率和危害程度(Chiono *et al.*, 2017)，比如 Salis 等(2016)模拟了地中海地区进行森林可燃物处理后火行为的变化，发现随着可燃物处理面积的增大，燃烧概率、过火面积等显著降低。然而，以往的研究只是对灭火情景下的可燃物处理效果进行研究，未结合自然火情景对可燃物处理的机理、效果进行比较、评估。本文同时模拟了两种不同火控制政策下的 9 种可燃物处理方案，并从火烧面积、不同强度火烧面积等指标来评价不同可燃物处理方案对林火情势的影响。

研究表明，在自然火和灭火情景下进行可燃物处理均可以将部分中强度火（3 级火）、高强度火（4、5 级火）转化为低强度火（1、2 级火），从而降低林火强度。这一结果既证实了森林可燃物处理的有效性，又满足了实施森林可燃物处理的目的，即降低高强度火，而不是为了使火灾变得更容易被扑灭(Reinhardt *et al.*, 2008)。但是，自然火情景下进行可燃物处理的效果不如灭火情景下明显，可能因为自然火情景下，林火发生频率高，火烧面积大，导致可燃物积累量少，所以进行可燃物处理不足以产生显著效果，而灭火情况下，林火发生频率较低，可燃物积累量多，因此进行可燃物处理效果显著，对比证实了长期实行灭火政策会

造成可燃物累积,易发生高强度火灾(Chang *et al.*, 2007)。因此,目前森林管理无法直接回到不灭火状态,并且有必要辅助进行森林可燃物处理。

本研究还发现,10%的处理面积、每20年处理1次的频率下,粗可燃物去除+计划火烧方案可以满足当前灭火政策下森林管理的需求。但2%的处理面积、每5年处理1次的粗可燃物去除+计划火烧方案下,可燃物处理效果却较差,可能是由于当地可燃物累积速度较慢,所以高频率的处理并不能弥补因处理面积减少所造成的效果弱化(Kreye *et al.*, 2015)。粗可燃物去除由于处理过程中产生大量细可燃物,导致长期细可燃物堆积,提高林火发生概率;计划火烧虽然清除了细可燃物,但并未对粗可燃物进行处理,长此以往粗可燃物累积,极易发生高强度火灾(Russell-Smith *et al.*, 2020),所以这两种也未取得较理想的效果。这与刘志华等(2009)的研究结果相一致,该研究认为在相同处理条件下,粗可燃物去除+计划火烧是最有效的可燃物管理手段,但此研究并未对处理面积和处理频率进行变量组合。所以本研究认为适合于目前大兴安岭地区的森林管理方案为:继续实施灭火政策,并保证每20年对10%的面积进行一次粗可燃物去除+计划火烧处理。

本研究结果为大兴安岭地区森林可燃物处理提供了一定的理论帮助,并同时证实了进行森林可燃物处理的必要性和有效性。但可燃物处理方法、面积、频率的组合情况有很多种,本研究仅采用有代表性的、实践性较强的9种可燃物处理方案进行模拟,从其中选择合适的处理方案。因此,未来在大兴安岭地区实施森林可燃物管理时,可进一步根据实施可燃物处理前、后的实时效果进行调整,并进一步补充相关研究。

4 结论

长期实施灭火政策导致森林可燃物不断累积,易发生灾难性火灾。自然火情景下,林火发生频繁,可燃物积累量少于现行灭火情景,平均火灾强度也较低,因此在当前灭火政策下进行森林可燃物处理是十分必要的。在模拟的9种可燃物处理方案中,方案B33在降低林火强度上表现出显著作用,因此,我们最终确定适合于大兴安岭地区的森林可燃物处理方案为:保证每20年对10%的面积进行一次粗可燃物去除+计划火烧处理的基础上继续实行灭火政策。由于可燃物处理方法、面积、频率组合情况较为复杂,在后期的实践过程中应进一步结合实际情况加观测、分析和调整,以找到最适合我国北方森林的可燃物处理方案。

参考文献

- 刘志华,常禹,贺红士,等. 2009. 模拟不同森林可燃物处理对大兴安岭潜在林火状况的影响. *生态学杂志*, **28**(8): 1462-1469.
- 罗旭,贺红士,梁宇,等. 2016. 林火干扰对大兴安岭主要林分类型地上生物量预测的影响模拟研究. *生态学报*, **36**(4): 1104-1114.
- 徐崇刚. 2006. 空间直观森林景观模型不确定性分析(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- Baker WL, Williams MA. 2018. Land surveys show regional variability of historical fire regimes and dry forest. *Ecological Applications*, **28**: 284-290.
- Baltzer JL, Day NJ, Walker XJ, *et al.* 2021. Increasing fire and the decline of fire adapted black spruce in the boreal forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118**: e2024872118.
- Benali A, SACL, Pinho J, *et al.* 2021. Understanding the impact of different landscape-level fuel management strategies on wildfire hazard in Central Portugal. *Forests*, **12**: 522.
- Bradstock RA, Hammill KA, Collins L, *et al.* 2009. Effects of weather, fuel and terrain on fire severity in topographically diverse landscapes of south-eastern Australia. *Landscape Ecology*, **25**: 607-619.
- Brennan TJ, Keeley JE. 2015. Effect of mastication and other mechanical treatments on fuel structure in chaparral. *International Journal of Wildland Fire*, **24**: 949-963.

- Chang Y, He HS, Bishop L, *et al.* 2007. Long-term forest landscape responses to fire exclusion in the Great Xing'an Mountains, China. *International Journal of Wildland Fire*, **16**: 34-44.
- Chang Y, He HS, Hu Y, *et al.* 2008. Historic and current fire regimes in the Great Xing'an Mountains, northeastern China: Implications for long-term forest management. *Forest Ecology and Management*, **254**: 445-453.
- Chiono LA, Fry DL, Collins BM, *et al.* 2017. Landscape-scale fuel treatment and wildfire impacts on carbon stocks and fire hazard in California spotted owl habitat. *Ecosphere*, **8**: e01648.
- Collins L, Bennett AF, Leonard SWJ, *et al.* 2019. Wildfire refugia in forests: Severe fire weather and drought mute the influence of topography and fuel age. *Global Change Biology*, **25**: 3829-3843.
- Fang L, Yang J, Zu J, *et al.* 2015. Quantifying influences and relative importance of fire weather, topography, and vegetation on fire size and fire severity in a Chinese boreal forest landscape. *Forest Ecology and Management*, **356**: 2-12.
- Fulé PZ, Crouse JE, Roccaforte JP, *et al.* 2012. Do thinning and/or burning treatments in western USA ponderosa or Jeffrey pine-dominated forests help restore natural fire behavior? *Forest Ecology and Management*, **269**: 68-81.
- He HS, Mladenoff DJ. 1999. Spatially explicit and stochastic simulation of forest-landscape fire disturbance and succession. *Ecology*, **80**: 81-99.
- Hyypä J, Hyypä H, Leckie D, *et al.* 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, **29**: 1339-1366.
- Kreye JK, Kobziar LN. 2015. The effect of mastication on surface fire behaviour, fuels consumption and tree mortality in pine flatwoods of Florida, USA. *International Journal of Wildland Fire*, **24**: 573-579.
- Liang S, Hurteau MD, Westerling AL. 2017. Response of Sierra Nevada forests to projected climate-wildfire interactions. *Global Change Biology*, **23**: 2016-2030.
- Low KE, Collins BM, Bernal A, *et al.* 2021. Longer-term impacts of fuel reduction treatments on forest structure, fuels, and drought resistance in the Lake Tahoe Basin. *Forest Ecology and Management*, **479**: 118609.
- Luo X, He HS, Liang Y, *et al.* 2015. Evaluating simulated effects of succession, fire, and harvest for LANDISPRO forest landscape model. *Ecological Modelling*, **297**: 1-10.
- Martorano CA, Kane JM, Engber EA, *et al.* 2020. Long-term fuel and understorey vegetation response to fuel treatments in oak and chaparral stands of northern California. *Applied Vegetation Science*, **24**: e12551.
- Miller C. 2012. The hidden consequences of fire suppression. *Park Science*, **28**: 75-80.
- Mladenoff DJ, He HS. 1999. Design and behavior of LANDIS, an object-oriented model of forest landscape disturbance and succession/Mladenoff DJ, Baker WL, eds. *Advances in spatial modeling of forest landscape change: Approaches and applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Mladenoff DJ. 2004. LANDIS and forest landscape models. *Ecological Modelling*, **180**: 7-19.
- Morici KE, Bailey JD. 2021. Long-term effects of fuel reduction treatments on surface fuel loading in the Blue Mountains of Oregon. *Forests*, **12**: 1306.
- Oliveira TM, Barros AMG, Ager AA, *et al.* 2016. Assessing the effect of a fuel break network to reduce burnt area and wildfire risk transmission. *International Journal of Wildland Fire*, **25**: 619-632.
- Reed WP, Varner JM, Knapp EE, *et al.* 2020. Long-term changes in masticated woody fuelbeds in northern California and southern Oregon, USA. *International Journal of Wildland Fire*, **29**: 807-819.
- Reinhardt ED, Keane RE, Calkin DE, *et al.* 2008. Objectives and considerations for wildland fuel treatment in forested ecosystems of the interior western United States. *Forest Ecology and Management*, **256**: 1997-2006.
- Russell-Smith J, McCaw L, Leavesley A. 2020. Adaptive prescribed burning in Australia for the early 21st Century – Context, status, challenges. *International Journal of Wildland Fire*, **29**: 305-313.

- Salis M, Laconi M, Ager AA, *et al.* 2016. Evaluating alternative fuel treatment strategies to reduce wildfire losses in a Mediterranean area. *Forest Ecology and Management*, **368**: 207-221.
- Sandberg DV. 2001. Characterizing fuels in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire*, **10**: 381-387.
- Volkova L, Weston CJ. 2019. Effect of thinning and burning fuel reduction treatments on forest carbon and bushfire fuel hazard in *Eucalyptus sieberi* forests of South-Eastern Australia. *Science of the Total Environment*, **694**: 133708.
- Weston CJ, Di Stefano J, Hislop S, *et al.* 2022. Effect of recent fuel reduction treatments on wildfire severity in southeast Australian *Eucalyptus sieberi* forests. *Forest Ecology and Management*, **505**: 119924.
- Wu Z, He HS, Liu Z, *et al.* 2013. Comparing fuel reduction treatments for reducing wildfire size and intensity in a boreal forest landscape of northeastern China. *Science of the Total Environment*, **454-455**: 30-39.

作者简介 贺 涵, 女, 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为森林可燃物处理的生态效应评估。E-mail: hehanone@163.com

责任编辑 张 敏