

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160353

疏伐对北京西山油松林可燃物特征及潜在火行为影响

宋洁¹ 朱敏¹ 刘晓东¹ 任云卯² 王奇峰² 金莹杉²

(1 北京林业大学林学院 2 北京市西山试验林场)

摘要:本研究在北京西山林场选择不同疏伐强度油松林,疏伐强度分别是未疏伐林分(CK)、低强度疏伐15%(L)、中强度疏伐35%(M)、高强度疏伐50%(H)。通过野外样地调查和室内试验,研究不同疏伐强度对林分可燃物载量及分布特征影响;应用BehavePlus林火软件,研究不同林分潜在火行为特征。结果表明:1)油松林地表可燃物载量随疏伐强度加大而增加,即 $H > M > L > CK$;2)各林分可燃物负荷量垂直分布均以0~2 m层最大,随着高度的增加呈现减少的趋势;3)不同疏伐强度对林分潜在火行为指标(火蔓延速率、火线强度、火焰高度及单位面积发热量)影响显著,趋势为 $L > CK > M > H$ 。研究结果可为研究地区的森林可燃物管理提供科学依据。

关键词:油松;疏伐;可燃物特征;地表潜在火行为

中图分类号:S762.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2017)05-0041-07

SONG Jie¹; ZHU Min¹; LIU Xiao-dong¹; REN Yun-mao²; WANG Qi-feng²; JIN Ying-shan². **Effects of thinning on fuel characteristics and potential fire behaviors of *Pinus tabuliformis* forest in Beijing West Mountain.** *Journal of Beijing Forestry University* (2017)39(5) 41-47 [Ch, 41 ref.]

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

2 Beijing Xishan Mountain Experimental Forest Farm, Beijing, 100093, P. R. China.

The typical *Pinus tabuliformis* forests were selected in Beijing Xishan Experimental Forest Farm. Thinning treatment was conducted with different intensities, i. e. unthinning (0%, CK), low intensity (15%, L), moderate intensity (35%, M), and high intensity (50%, H). Based on the field investigation, the fuel loading and vertical distribution characteristics of different thinning stands were studied. By using BehavePlus fire model software, the potential fire behaviors of different thinning stands were analyzed. The results indicated that: 1) thinning intensity affected the fuel loading of studied stands, with the trend of $H > M > L > CK$; 2) The 0-2 m layer was showed with the highest fuel loading value in all stands, and the fuel loading decreased along with the height increasing; 3) The potential fire behaviors, including speed of propagation, heat per unit area, fire line intensity, and flame length, which were all significantly affected by thinning intensity, were showed with the trend of $L > CK > M > H$. The above results can provide scientific basis for the fuel management in studied area.

Key words *Pinus tabuliformis*; thinning; fuel characteristics; potential fire behavior

火是特殊且重要的生态因子^[1]。森林大火不仅对人类的生命和财产造成巨大的损失^[2],同时也会影响到森林的更新和演替^[3]。

森林可燃物是林火发生和蔓延的物质基础,与火源和火环境相比,更易于进行人为管理^[4-5]。早在20世纪初期,就有国外学者提出合理高效的调控

林分内可燃物,可有效的预防森林火灾的发生,减缓林火蔓延、降低火灾对森林资源和生态环境造成的危害^[6-11]。因此,可燃物调控对预防森林火灾的发生及蔓延具有重要的意义^[12-13]。

森林可燃物管理的主要方法包括修枝、割灌、清理枯落物、营林抚育、计划烧除等^[14]。有效调控森

收稿日期:2016-11-24 修回日期:2017-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(31270696)。

第一作者:宋洁。主要研究方向:森林防火。Email:1046304287@qq.com 地址:100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者:刘晓东,副教授。主要研究方向:生态学。Email:xd_liu@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

林可燃物,可以利用营林抚育的措施,通过调整林分结构来控制可能发生火灾的物理环境^[15],而疏伐是营林抚育措施中最为常用的一种措施^[16],它可以改变密度结构及树冠可燃物的特征^[17-18],对火灾的发生和蔓延都有显著的影响。疏伐在营林抚育方面主要研究其与林分生长的关系^[19-21],近年来也逐渐开展疏伐与林分密度及密度模型建立的研究^[22-23]。目前,关于可燃物的研究多集中在森林可燃物的空间分布和分布模型的建立^[24-25],可燃物调控对野生动物栖息地的影响^[26]。关于潜在火行为方面,主要研究林火的预测和火行为模型的应用,以及模型特征参数的计算等^[27-30]。而对于不同疏伐强度对林分可燃物特征以及潜在火行为方面的研究较少^[31]。潜在火行为多使用 BehavePlus (5.0.5) 林火软件。BehavePlus (5.0.5) 林火软件是美国北方林火试验室在 Rothermel 林火模型的基础上建立的,该模型现在是世界上利用最为广泛的林火模型^[32-36]。

本研究选择北京西山地区油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林。油松是华北地区典型针叶树种,比较易燃,是森林火灾多发林分。通过在野外建立疏伐与未疏伐林分样地,开展外业调查和室内试验,结合林火软件,对比研究不同疏伐强度对油松林可燃物特征及潜在火行为的影响,从而为研究地区的森林可燃物管理提供科学依据。

1 研究区概况

样地设置在北京西山林场卧佛寺分场,选取的是油松人工林。该地区地理坐标为 116°28'E, 39°4'N, 海拔最高 800 m, 主要土壤类型为褐土, 气候类型是典型的大陆性季风气候, 年平均降水量 660 mm, 尤其在秋季到来年春季干旱多风少雨, 极易发生火灾。林场的森林类型主要是人工纯林和针阔混交林。主要乔木树种有油松、侧柏 (*Platycladus*

orientalis) 等针叶树种以及以刺槐 (*Robinia pseudoacacis*)、白蜡 (*Fraxinus chinensis*) 等为代表的阔叶树种。灌木有酸枣 (*Ziziphus jujuba*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 等。草本植物有荩草 (*Arthraxon hispidus*)、隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*) 等。

2 研究方法

基于林分因子、立地因子,选择林龄相同的人工油松林设置 4 块样地,样地大小为 20 m × 20 m, 在设置样地的过程中记录坡向、坡度、经纬度以及海拔等立地条件。根据样地内可燃物特征,并结合西山林场防火季营林抚育的相关措施,制定了可燃物疏伐强度:CK (未疏伐)、L (疏伐强度 15%)、M (疏伐强度 35%)、H (疏伐强度 50%)。2014 年 3 月主要针对未疏伐林分进行第 1 次野外样地调查,在 2014 年的 11 月将 3 块样地进行不同强度的疏伐,2015 年的 10 月份对疏伐过的林分进行野外样地调查。

2.1 可燃物特征的研究

本文研究油松林的森林可燃物垂直分布及地表可燃物载量变化。采用野外样地调查和对照试验的方法开展。首先对样地内的林分因子、地形因子,样地内枯落物、灌木草本层(含幼树)以及乔木层可燃物负荷量等进行调查。林分因子包括:胸径、树高、冠幅、郁闭度等。地形因子包括:海拔、坡度、坡向、经纬度等。

可燃物载量是指单位面积所有可燃物的绝干质量。调查主要采用收获法。在样地的对角线及中心机械设置 5 个样方,大小为 1 m × 1 m,并对样方内的地表可燃物按照 1、10、100 h 时滞的标准分级采集,野外称鲜质量,并采集将近 100 g 样品做好标记,带回彻底烘干,称绝干质量计算含水率,用于计算可燃物载量。

表 1 油松林疏伐强度基本特征

Tab. 1 Basic characteristics of *Pinus tabulaeformis* stands with different thinning intensities

疏伐强度 Thinning intensity	海拔 Altitude/m	林龄 Forest age/a	坡度 Slope degree/(°)	坡向 Slope aspect	平均胸径 Average DBH/cm	平均高度 Average height/m	密度/(株·hm ⁻²) Density/(plant·ha ⁻¹)	郁闭度 Canopy density
CK	309	32	25	N	12.7	8.6	1359	0.90
L	312	32	27	N	13.9	9.1	1159	0.85
M	325	32	25	N	16.1	7.3	901	0.65
H	302	32	22	N	14.5	6.2	717	0.50

注:CK 为空白对照;L 为疏伐强度 15%;M 为疏伐强度 35%;H 为疏伐强度 50%。下同。Notes: CK, control; L, thinning intensity is 15%; M, thinning intensity is 35%; H, thinning intensity is 50%. The same below.

调查可燃物垂直分布主要采用标准枝法。首先计算样地内油松的平均胸径,根据计算得出的结果选出平均木,再选其中3棵作为标准木。在标准木的垂直方向划分层次,每1 m分为1层,按照从下往上的顺序逐层调查,每层选择标准枝,对标准枝的长度和条数进行目测。活枝与死枝分别进行取样,分别测其大枝、小枝和叶的鲜质量。测鲜质量后各取150 g做好标记,带回实验室烘干称质量,计算绝干质量,求平均值。

2.2 林分潜在火行为的研究

根据试验地不同疏伐强度后1、10、100 h时滞等不同种类地表枯落物、活灌木、活草本等可燃物载量、含水率、可燃物床层厚度、热值以及坡度、火焰中部风速等因子,根据 Rothermel 地表火蔓延模型,结合使用 BehavePlus(5.05)软件计算该地区油松林在不同强度疏伐后的地表潜在火行为。

对火行为的描述主要采用火线强度、火焰高度和火蔓延速率等指标。火焰高度愈高,火线强度就越大,森林受损范围越大。火焰高度与可燃物类型、可燃物载量、分层和蔓延速率密切相关。火线强度和火蔓延速率可通过方程式进行计算。

1) 蔓延速率:蔓延速率是火通过地表可燃物的速度,火尾蔓延速率和火两侧扩散速度不能达到统一。目前,应用最广泛的是 Rothermel 等^[37]于1972年在芬特逊研究基础上进行实地试验后提出并建立的 Rothermel 蔓延模型。

$$R = \frac{I_R \xi}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} (1 + \phi_s + \phi_w) \quad (1)$$

式中: R 为林火蔓延速度, m/min; I_R 为火焰区反应强度, kJ/(min·m²); ξ 为林火蔓延率(无因次量); ϕ_s 为风速修正系数; ϕ_w 为坡度修正系数; ρ_b 为有效热系数(无因次量); Q_{ig} 为点燃单位质量的可燃物所需要的热量, kJ/kg。

2) 火线强度:火线强度被定义为火源前后1 m内易点燃物质单位时间内产生的热值,与扩散速度和单位面积发热量相关,火焰高度是重要影响因素。本研究利用的是 Byram 火强度公制计算公式^[38]:

$$I = 0.007HWR \quad (2)$$

式中: I 为火线强度, kW/m; H 为可燃物的热值, J/g; W 为可燃物负荷量, t/hm²; R 为蔓延速率, m/min。

3) 火焰高度:1980年 Rothermel 等^[37]根据 Byram 对火焰高度的计算公式,改写火焰高度公式为:

$$L = 0.237I^{0.46} \quad (3)$$

式中: L 为火焰高度, m。

4) 单位面积发热量:也称火面强度,指火源点前部单位火烧面积上释放出来的热量,它不受风、坡度和蔓延速率的影响,只和易点燃物质及热量值相关。

2.3 数据分析

1) 将调查得到的可燃物载量及其垂直分布情况进行分析,利用 Excel 软件进行数据统计,并绘制相应的可燃物垂直分布图和可燃物分类图,利用 SPSS 统计软件对相应组分可燃物进行统计分析,确定显著影响地表可燃物载量的疏伐强度。

2) 对于不同疏伐强度对潜在火行为的影响,根据 Rothermel 地表火蔓延模型并结合使用 BehavePlus 火模型软件利用野外调查所得的数据进行分析。

3 结果与分析

3.1 林分可燃物特征

可燃物空间分布是不同种类和不同强度林火发生的基础,空间可燃物负荷量也称之为可燃物空间密度,密度越大,可燃物空间分布越丰富。已有对森林可燃物层次划分的理论将2~3 m规定为引燃树冠火所需的可燃物。本研究将高度位于1.5~3 m之间的可燃物规定为树冠火的引燃物,将3 m以上的范围定为树冠可燃物。引燃物主要包括高于1.5 m的灌木(含幼树),低于3 m的乔木小枝、叶和枯枝。

3.1.1 地表可燃物载量

根据地表可燃物内层方法:1、10、100 h时滞可燃物、灌木可燃物、草本可燃物。计算油松林地表各层可燃物负荷量,并进行标准差计算,得到地表、可燃物分布数据见表2。

以表2可以看出,灌木层可燃物载量在地表可燃物载量中所占比例最大,不同疏伐强度灌木层可燃物载量分别1.576 2、1.712 6、2.542 7、3.278 5 kg/m²。草本层和灌木层可燃物载量随疏伐强度的增加而增加。1、10和100 h时滞可燃物负荷量随疏伐强度的增加先增加后减少,且在高强度疏伐后明显减少。地表可燃物载量的总量随疏伐强度的增强而增加,低强度疏伐(L)较未疏伐林分(CK)没有明显的变化,中强度疏伐(M)后地表可燃物载量最大,为1.913 4 kg/m²,高强度疏伐(H)后地表可燃物载量减少为1.638 6 kg/m²,较中强度疏伐(M)减少14.4%。

表2 不同疏伐强度油松林不同种类地表可燃物载量

Tab.2 Surface fuel load and types of *Pinus tabuliformis* stands with different thinning intensities $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$

疏伐强度 Thinning intensity	1 h 时滞 1-hour time lag	10 h 时滞 10-hour time lag	100 h 时滞 100-hour time lag	草本层 Herb layer	灌木层 Shrub layer	地表可燃物总和 Total surface fuel
CK	0.479 9 ± 0.152 1	0.301 4 ± 0.038 1	0.108 7 ± 0.026 0	0.076 8 ± 0.004 0	1.576 2 ± 0.464 9	1.360 8 ± 0.879 5
L	0.502 6 ± 0.116 5	0.192 8 ± 0.037 5	0.078 6 ± 0.009 6	0.104 0 ± 0.005 8	1.712 6 ± 0.341 9	1.306 2 ± 0.964 6
M	0.446 5 ± 0.022 0	0.433 1 ± 0.043 0	0.254 9 ± 0.013 5	0.143 2 ± 0.010 4	2.542 8 ± 0.407 1	1.913 4 ± 0.949 7
H	0.265 8 ± 0.073 5	0.208 2 ± 0.031 8	0.171 3 ± 0.014 9	0.173 7 ± 0.014 5	3.278 5 ± 0.552 2	1.638 6 ± 1.388 0

将不同疏伐强度不同组分可燃物两两进行方差比较后得到图1。

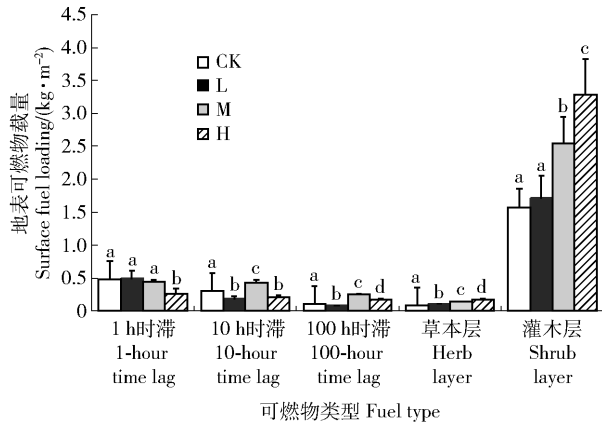


图1 不同种类地表可燃物负荷量比较

Fig.1 Comparison in fuel loads under different types of surface (mean ± standard error)

由图1可以看出,1 h时滞经过低强度疏伐和中度疏伐林分后差异不显著($P > 0.05$),经过重度疏伐后林分差异显著($P < 0.05$)。10 h时滞经过不同强度疏伐后差异均显著($P < 0.05$),且中度疏伐的差异性较为显著。100 h时滞在经过不同强度疏伐后差异均显著($P < 0.05$),且中强度疏伐后差异的显著性较为明显。草本层在经过不同强度疏伐后差异均十分显著($P < 0.05$)。灌木层经过低强度疏伐后差异性不显著($P > 0.05$),在中强度疏伐后差异性较为显著($P < 0.05$),且高强度疏伐后差异依然显著。

3.1.2 可燃物垂直分布

根据可燃物的分层方法,以0~2 m、2~3 m、3~4 m、4~5 m、5~6 m、6~7 m、7~8 m、8~9 m、9~10 m以上为基本的分层标准,得出可燃物负荷量垂直分布特征,如图2所示。

由图2可知,油松林经过不同强度疏伐后,0~2 m层可燃物负荷量最大,主要是由两大类可燃物组成:地表枯枝落叶层和灌木可燃物。CK、L、M、H林分该层可燃物负荷量分别为2.88、3.12、3.60、4.37 kg/m^2 ,呈逐渐递增的趋势,分别占总体

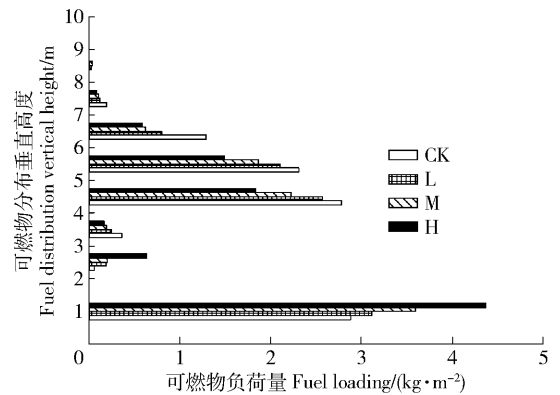


图2 不同疏伐强度油松林可燃物垂直分布情况

Fig.2 Fuel loading vertical distribution in fuel loading of *Pinus tabuliformis* stands under different thinning intensities

可燃物负荷量的29.2%、33.6%、40.6%、47.2%;2~4 m层可燃物负荷量较低,分别为0.44、0.42、0.40、0.80 kg/m^2 。冠层可燃物负荷量最多在4~5 m层,分别为2.78、2.57、2.23、1.84 kg/m^2 ,分别占整个林冠层的42.3%、43.2%、45.8%、45.9%。随着林木高度的继续增加,可燃物负荷量呈递减趋势;5~6 m层分别为2.30、2.10、1.86、1.49 kg/m^2 。

3.2 林分地表潜在火行为

林分地表潜在火行为指标主要包括火蔓延速率、火线强度、火焰高度和单位面积发热量。火蔓延速率表示森林过火面积大小,单位面积发热量表达了森林着火范围的大小。在森林火灾防控工作过程中,常将火划分为不同的火强度等级:低强度火(350~750 kW/m^2)、中强度火(750~3500 kW/m^2)、高强度火(>3500 kW/m^2)^[39]。

根据调查统计的数据,根据火蔓延模型对不同疏伐强度的油松林地地表潜在火行为指标进行分析,见表3。

未疏伐(CK)林分的火蔓延速率、火线强度、火焰高度和单位面积发热量都低于低强度疏伐(L)。在低强度疏伐(L)之后火蔓延速率增加为5.7 m/min ,火线强度增加为2570 kW/m^2 ,火焰高度增加为2.9 m,单位面积发热量稍有增加,为27018 kJ/m^2 。

表3 油松林不同疏伐强度地表火行为指标

Tab.3 Fire behavior indicators of *Pinus tabulaeformis* stands with different thinning intensities

项目 Item	CK	L	M	H
火蔓延速率 Speed of fire propagation/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	4.8	5.7	2.4	0.3
火线强度 Fire line intensity/($\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$)	1 697	2 570	31	9
火焰高度 flame height/m	2.4	2.9	0.4	0.1
单位面积发热量 Heat per unit area/($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	25 876	27 018	4 009	589

但随着疏伐强度的增加呈现出了明显的下降趋势,中等强度疏伐(M)后,潜在火行为指数均显著降低,林火蔓延速率为 $2.4\text{ m}/\text{min}$,火线强度为 $31\text{ kW}/\text{m}$,火焰高度为 0.4 m ,单位面积发热量为 $4\ 009\text{ kJ}/\text{m}^2$ 。高强度疏伐(H)后,林火的蔓延速率降到 $0.3\text{ m}/\text{min}$,线强度为 $9\text{ kW}/\text{m}$,火焰强度趋近于0,单位面积发热量明显下降为 $589\text{ kJ}/\text{m}^2$ 。

4 结论与讨论

本研究通过对油松林不同强度疏伐强度可燃物特征调查,得出林分内可燃物垂直分布情况及地表可燃物负荷量。通过对疏伐后林下灌草的调查,进行单因素分析得出疏伐对林分生物多样性的影响。并根据外业调查的数据计算可燃物地表火行为指数,分析林火蔓延速率、单位面积发热量、火线强度和火焰高度等林火特征指标。

1)地表可燃物负荷量的总量随着疏伐强度的增强而增加,即 $H > M > L > \text{CK}$ 。灌木层可燃物载量最多,4块样地中灌木层可燃物占地表可燃物总量的比例为 61.98% 、 66.12% 、 66.56% 、 80.01% ,且随疏伐强度的增强而增加。草本层可燃物载量随疏伐强度的增加而增加。1、10和100 h时滞的可燃物载量逐渐减少。地表可燃物载量的总量随疏伐强度的增强而增加,且中强度疏伐(M)后地表可燃物载量最大,较未疏伐(CK)林分和低强度疏伐(L)林分增加了 40.6% 和 46.5% 。地表可燃物进行方差分析可得出不同疏伐强度对不同地表可燃物载量的影响是有差异的,1 h时滞在高强度疏伐(H)后差异显著,10 h时滞经过中强度疏伐(M)后差异显著,100 h时滞在不同疏伐强度差异均显著,且中强度疏伐后差异的显著性较为明显。草本层在经过不同强度疏伐后差异均十分显著。灌木层经过在中强度疏伐后差异性较为显著。随着疏伐强度的增加,林分郁闭度减小,林内的光照条件得到改善,阳生植物得到更好的生长,尤其是灌木层可燃物载量大幅增

加^[40]。同时,疏伐后遗落的枯枝落叶等将会大幅度减少,导致1、10和100 h时滞可燃物载量逐渐减少。由于灌木层可燃物载量所占的比例较大,所以地表可燃物总量是随着疏伐强度的增强而增加。

2)林分0~2 m层可燃物负荷量最大,冠层可燃物负荷量最多在4~5 m层,可燃物负荷量随着林木高度的继续增加呈递减趋势。人工油松林是近熟林,地表枯枝落叶较多,林下灌草(含幼树)生长茂盛,所以0~2 m层可燃物分布较多,随着疏伐强度的增加改变了郁闭度,有利于林下阳生植物的生长,使该层可燃物负荷量增加^[41]。2~4 m层的可燃物由于修枝等营林措施使分布较少。4 m以上为树冠层,主要包括乔木活枝和死枝,可将地表火衍生为树冠火。

3)油松林经过低强度疏伐(L)后,地表潜在火行为指标不但没有降低,反而有所增加;在中强度疏伐(M)后,指标都有了明显的下降;高强度疏伐(H)后,指标较未疏伐林分(CK)均降低了90%以上,变化规律为 $L > \text{CK} > M > H$ 。低强度疏伐(L)后地表潜在火行为指标出现了增加的趋势主要是因为疏伐后林内通风及光照条件得到改善,林内自然整枝较差,地表可燃物累积较多且易燃,提高了地表火潜在火行为发生的可能性。随着疏伐强度的加大,尤其是中强度疏伐(M)后,林分密度减小,地表枯枝落叶等可燃物载量大幅度降低,地表火的潜在火行为指标显著下降。

综上所述,人工油松林经过中强度疏伐(M,疏伐强度35%)后对林分可燃物特征及潜在火行为影响最为显著。该研究结果可为本地区的森林可燃物管理提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 贺红土,常禹,胡远满,等.森林可燃物及其管理的研究进展与展望[J].植物生态学报,2010,34(6):741-752.
HE H S, CHANG Y, HU Y M, et al. Contemporary studies and future perspectives of forest fuel and fuel management [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(6): 741-752.
- [2] 田晓瑞,赵凤君,舒立福,等.1961—2010年中国植被区的气候与林火动态变化[J].应用生态学报,2014,25(11):3279-3286.
TIAN X R, ZHAO F J, SHU L F, et al. Changes of climate and dynamic in China vegetation zone during 1961-2010 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11): 3279-3286.
- [3] 孙龙,张瑶,国庆喜,等.1987年大兴安岭林火碳排放及火后NPP恢复[J].林业科学,2009,45(12):100-104.
SUN L, ZHANG Y, GUO Q X, et al. Carbon emission and a dynamic of NPP post forest fire in 1987 in Daxing'an Mountains [J]. Scientia Sinicae, 2009, 45(12): 100-104.
- [4] 高国平,周志权,王忠友.森林可燃物研究综述[J].辽宁林业科技,1998(4):34-37.

- GAO G P, ZHOU Z Q, WANG Z Y. A review of research on forest fuel [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 1998 (4):34-37.
- [5] 刘志华,杨健,贺红土,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.
- LIU Z H, YANG J, HE H S, 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 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6):1669-1677.
- [6] 周润青,刘晓东,郭怀文. 大兴安岭南主要林分地表可燃物负荷量及其影响因子研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(6):131-137.
- ZHOU J Q, LIU X D, GUO H W. Surface fuel and relevant influencing factors of main forest types in southern Daxing'anling [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2014, 42(6):131-137.
- [7] 朱敏,刘晓东,李璇皓,等. 北京西山油松林可燃物调控的影响研究[J]. 生态学报,2015,35(13):4483-4491.
- ZHU M, LIU X D, LI X H, et al. Assessment of impact of fuel management in *Pinus tabulaeformis* forest in the Beijing West Mountain Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13):4483-4491.
- [8] JIMENEZ E, VEGA-NIEVA D, REY E, et al. Midterm fuel structure recovery and potential fire behaviour in a *Pinus pinaster* Ait. forest in northern central Spain after thinning and mastication [J]. European Journal of Forest Research, 2016, 135(5):675-686.
- [9] POTTS J B, STEPHENS S L. Invasive and native plant responses to shrub land fuel reduction: comparing prescribed fire, mastication, and treatment season [J]. Biological Conservation, 2009, 142:1657-1664.
- [10] SHEPHERD C, GRIMSRUD K, BERRENS R P. Determinants of national fire plan fuels treatment expenditure: a revealed preference analysis for northern new Mexico [J]. Environmental Management, 2009, 44(4):776-788.
- [11] SHOW S B, KOTOK E I. Cover type and fire control in the national forests of northern California [M]. Washington: US Department of Agriculture, 1929.
- [12] KNAPP E E, KEELEY J E, BALLANGER E A, et al. Fuel reduction and coarse woody debris dynamics with early season and late season 9 prescribed fire in a Sierra Nevada mixed conifer forest [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 208:383-397.
- [13] SCHMIDT D A, TAYLOR A H. The influence of fuels treatment and landscape arrangement on simulated fire behavior, Southern Cascade range, California [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(8/9):3170-3184.
- [14] 王明玉,舒立福,姚树人. 北京地区森林可燃物人工调控技术[J]. 森林防火,2012,9(3):46-48.
- WANG M Y, SHU L F, YAO S R. Artificial control technology of forest fuel in Beijing Area [J]. Forest Fire Prevention, 2012, 9(3):46-48.
- [15] 屈宇,于汝元,张延达,等. 营林防火的理论与实践[J]. 林业资源管理,2002(4):13-16.
- QU Y, YU R Y, ZHANG Y D, et al. Theory and practice on forest fire prevention by means of tending [J]. Forest Resources Management, 2002(4):13-16.
- [16] 金琳,刘晓东,张永福. 森林可燃物调控技术方法研究进展[J]. 林业科学,2012,48(2):155-161.
- JIN L, LIU X D, ZHANG Y F. A review on the forest fuel treatment and reduction [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(2):155-161.
- [17] JIMÉNEZ E, VEGA-NIEVA D, REY E, et al. Midterm fuel structure recovery and potential fire behaviour in a *Pinus pinaster* Ait. forest in northern central Spain after thinning and mastication [J]. European Journal of Forest Research, 2016, 135(5):675-686.
- [18] AGEE J K, LOLLEY M R. Thinning and prescribed fire effects on fuels and potential fire behaviour in an eastern Cascades Forest, Washington, USA [J]. Fire Ecol, 2006, 2:3-19.
- [19] 刘向兵,刘亚茜,李兵兵,等. 生态疏伐对林分密度及直径结构的影响[J]. 西北林学院学报,2012,27(3):145-149.
- LIU X B, LIU Y X, LI B B, et al. Influences of ecological thinning on the stand density and diameter structure [J]. Journal of Northwest Forest University, 2012, 27(3):145-149.
- [20] 王勇. 疏伐与修枝对人工红松果材林生长于结实的影响[J]. 甘肃农业科技,2016(6):44-47.
- WANG Y. Effects of thinning and pruning on the growth of artificial korean pine [J]. Gansu Agr Sci and Techn, 2016(6):44-47.
- [21] 龙忠于,周开德,王华东. 不同间伐强度对杉木人工林分生长的影响[J]. 湖南林业科技,2016,43(3):104-108.
- LONG Z Y, ZHOU K D, WANG H D. Effects of intermediate cutting intensities on growth of planted *Cunninghamia lanceolata* forests [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2016, 43(3):104-108.
- [22] 魏志刚,蔡宝明. 长白落叶松母树林疏伐密度研究[J]. 防护林科技,2012(4):22-25.
- WEI Z G, CAI B M. Thinning density of *Larix olgensis* seed trees [J]. Protection Forest Science and Technology, 2012(4):22-25.
- [23] 侯聪,魏志刚,张力杰,等. 孟家岗红松母树林疏伐强度效应分析[J]. 林业科技开发,2014,28(1):41-46.
- HOU C, WEI Z G, ZHANG L J, et al. Effects of different thinning intensity on seed production stands of *Pinus koraiensis* in Mengjiagang Forestry Station [J]. China Forestry Science and Technology, 2014, 28(1):41-46.
- [24] 王叁. 川西南地区主要针叶林可燃物空间分布及潜在火行为[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- WANG S. Fuel spatial distribution and potential fire behavior of major coniferous forests in Southwest Sichuan, China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [25] 吴志伟,贺红土,梁宇,等. 丰林自然保护区森林可燃物模型的建立[J]. 应用生态学报,2012,23(6):1503-1510.
- WU Z W, HE H S, LIANG Y, et al. Establishment of standard forest fuel models for Fenglin Natural Reserve, Heilongjiang Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6):1503-1510.
- [26] 杨鸿培,宋军平,王巧燕. 西双版纳保护区计划烧除林下可燃物对大型食草哺乳动物群落结构及动态的影响[J]. 林业调查规划,2013,38(1):9-13.

- YANG H P, SONG J P, WANG Q Y. Impacts of fire prescribed use on the structure and dynamics of large herbivores in Sishuangbanna Nature Reserve[J]. Forest Inventory and Planning, 2013,38(1):9-13.
- [27] ALEXANDER M E, CRUZ M G. Evaluating a model for predicting active crown fire rate of spread using wildfire observations[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2006, 36(11):3015-3028.
- [28] 金森,刘磷霏,邸雪莹,等.平地无风条件下蒙古栎阔叶床层的火行为 I:蔓延速率影响因素与预测模型[J].应用生态学报,2012,23(1):51-59.
- JIN S, LIU B F, DI X Y, et al. Fire behavior of Mongolian oak leaves fuel-bed under no-wind and zero-slope conditions (I): factors affecting fire spread rate and modeling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(1):51-59.
- [29] 吴志伟,贺红土,胡远满,等. FARSITE 火行为模型的原理、结构及其应用[J].生态学杂志,2012,31(2):494-500.
- WU Z W, HE H S, HU Y M, et al. Principle, structure, and application of FARSITE fire behavior model[J]. Chinese Journal of Ecology,2012,31(2):494-500.
- [30] 舒立福,王明玉,田晓瑞,等.关于森林燃烧火行为特征参数的计算与表述[J].林业科学,2004,40(3):179-183.
- SHU L F, WANG M Y, TIAN X R, et al. Calculation and description of forest fire behavior characters[J]. Scientia Silvae Sinicae,2004,40(3):179-183.
- [31] 魏云敏,鞠琳.森林可燃物载量研究综述[J].森林防火,2006(4):18-21.
- WEI Y M, JU L. Summary of the study on forest fuel load[J]. Forest Fire Prevention,2006(4):18-21.
- [32] 王秋华,肖慧娟,李世友,等.基于 BehavePlus 的昆明西山国家森林公园潜在火行为研究[J].浙江林业科技,2013,33(4):43-48.
- WANG Q H, XIAO H J, LI S Y, et al. Study on potential fire behaviors of Xishan National Forest Park in Kunming using BehavePlus Model[J]. Jour of Zhejiang For Sci & Tech,2013,33(4):43-48.
- [33] ANDREWS P L. BehavePlus fire modeling system: past, present, and future[C]. Boston: American Meteorological Society,2007.
- [34] ANDREWS P L, PATRICIA L. Current status and future needs of the BehavePlus fire modeling system[J]. International Journal of Wildland Fire,2014,23(1):21-33.
- [35] 王凯,牛树奎.基于 Rothermel 模型的北京鹫峰国家森林公园潜在火行为[J].浙江农林大学学报,2016,33(1):42-50.
- WANG K, NIU S K. Research on the potential fire behavior in Jiufeng National Forest Park of Beijing based on the Rothermel Model [J]. Journal of Zhejiang A&F University,2016,33(1):42-50.
- [36] 张吉利,刘磷霏,褚腾飞,等.广义 Rothermel 模型预测平地无风条件下红松-蒙古栎林地混合可燃物的火行为[J].应用生态学报,2012,23(6):1495-1502.
- ZHANG J L, LIU B F, CHU T F, et al. Fire behavior of ground surface fuels in *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* mixed forest under no wind and zero slope condition: a prediction with extended Rothermel Model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(6):1495-1502.
- [37] ROTHERMEL R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[R]. Ogden UT: Intermountain Forest and Range Experiment Station of USDA Forest Service,1972:1-50.
- [38] BYRAM G M. Combustion of forest fuels [C] // DAVIS K P. Forest fire: control and use. New York: McGraw-Hill Book Company,1969:77-84.
- [39] 金琳.北京十三陵林场低山针叶林可燃物分布及调控技术研究[D].北京:北京林业大学,2012.
- JIN L. Fuel distribution and fuel control technology in the low mountain coniferous forest of Ming Tombs Forest Farm [D]. Beijing: Beijing Forestry University,2012.
- [40] 王晓丽,牛树奎,马钦彦,等.北京地区主要针叶林易燃可燃物垂直分布[J].北京林业大学学报,2009,31(2):31-35.
- WANG X L, NIU S K, MA Q Y, et al. Vertical distribution of flammable fuels in major conifer forests of Beijing area[J]. Journal of Beijing Forestry University,2009,31(2):31-35.
- [41] 胡海清.林火生态与管理[M].北京:中国林业出版社,2005:76-77.
- HU H Q. Forest fire ecology and management[M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2005:76-77.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑 赵秀海)