

王秋华, 闫想想, 龙腾腾, 等. 昆明地区华山松纯林枯枝的燃烧性研究[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(1): 66-73.



昆明地区华山松纯林枯枝的燃烧性研究

王秋华¹, 闫想想¹, 龙腾腾¹, 许若水¹, 叶彪², 陈启良², 李晓娜³

(1. 西南林业大学 土木工程学院/云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 云南 昆明 650224; 2. 云南森林自然中心, 云南 昆明 650224; 3. 西南林业大学 地理与生态旅游学院, 云南 昆明 650224)

摘要:【目的】枯枝是在垂直方向上的连续性可燃物, 是地表火转化为树冠火的关键, 研究华山松纯林枯枝的燃烧性, 以评估其可能形成树冠火的危险性。【方法】森林防火期内在云南森林自然中心华山松纯林连续分布区, 进行外业调查, 采集样品并进行室内燃烧试验, 结合野外状态和实验室分析测定, 利用含水率、载量、热值、引燃时间、火焰维持时间、无焰燃烧维持时间等指标, 研究了华山松纯林枯枝的燃烧性。【结果】在防火期, 华山松纯林枯枝的含水率为5.97%~15.66%, 载量为0.09~0.57 kg/m², 热值为17 291~18 812 kJ/kg, 引燃时间为3.5~4.1 s, 火焰维持时间达到9.2~16.9 min, 无焰燃烧维持时间26~36 min。【结论】华山松纯林枯枝的含水率极低, 载量不大, 灰分含量较高; 在防火紧要期, 枯枝很易燃, 只要有火源就能轻易被引燃, 而一旦发生火灾, 火焰能顺着枯枝快速蔓延至树冠形成树冠火。

关键词: 含水率; 载量; 燃烧性; 树冠火; 华山松; 昆明

中图分类号: S762.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2020)01-0066-08

Combustibility of Dead Branches in Pure Forest of *Pinus armandii* in Kunming

WANG Qiu-hua¹, YAN Xiang-xiang¹, LONG Teng-teng¹,
XU Ruo-shui¹, YE Biao², CHEN Qi-liang², Li Xiao-na³

(1. Yunnan Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control, School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Yunnan Natural Centre of Forestry, Kunming 650224, China; 3. School of Geography and Eco-tourism, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] Dry branches are continuous combustibles in the vertical direction and are the key to the conversion of surface fire to canopy fire. The combustibility of dead branches in the pure forest of *Pinus armandii* was investigated so as to evaluate its danger of causing canopy fire. [Method] After setting plots of *Pinus armandii* pure forests, which continuously distribute in Yunnan natural centre of forestry, northeastern Kunming, during the forest fire period between 2018 and 2019, field investigation was carried out, samples were collected and laboratory combustion test was carried out. Combined with field conditions and laboratory analysis, moisture content, fuel load, heat values, ignition time, flame holding time, flameless combustion maintenance time and other indicators were used to study the combustibility of the dead branches of *Pinus*

收稿日期: 2019-08-30 修回日期: 2019-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660210, 31960318)和云南省农业联合面上项目(2018FG001-055)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (31660210, 31960318) and Yunnan Agricultural Joint Project (2018FG001-055)

作者简介: 王秋华, 教授, 博士, 主要从事森林防火研究, orcid.org/0000-0002-0273-3510, qhwang2010@swfu.edu.cn。

armandii in order to evaluate the risk of crowning fire. [Result] In the forest fire period, the moisture content of the dead branches of *Pinus armandii* forest was 5.97%~15.66%, the fuel load was 0.09~0.57 kg/m², the heat values were 17 291~18 812 kJ/kg, and the ignition time was 3.5~4.1 s. The flame holding time reached 9.2~16.39 min, and the flameless combustion was maintained for 26~36 min. [Conclusion] The moisture content is very low, fuel load is small, but ash content of pure forest of *Pinus armandii* reached a high level. In the critical period of fire prevention, the dead branches of pure forest of *Pinus armandii* are easily flammable. As long as there is a fire source, it is easy to be ignited. In the event of a fire, the fire is likely to burn along the surface of the dead branches, spreading among the dead branches to the canopy and convert to canopy fire.

Keywords: moisture content; fuel load; combustibility; canopy fire; *Pinus armandii*; Kunming

【研究意义】森林可燃物是森林中能够燃烧的物质,是燃烧三要素的主体,影响到森林火灾的发生、控制、扑救及用火安全、火烧后的损失^[1-4]。森林可燃物是复杂的、多样的和动态变化的^[5]。对可燃物的特征,尤其是燃烧性进行深入研究,能够把握可燃物的基本属性,有利于可燃物的可持续管理^[6]。森林燃烧性指森林被引燃着火的难易程度以及着火后所表现出的燃烧状态和燃烧速度、火强度等的综合,包括可燃物的理化性质和空间组合特征^[7],是个综合指标,需要统筹考虑多个影响因素,定量表达。森林燃烧性的研究有利于制定科学的营林防火措施。【前人研究进展】现有森林可燃物燃烧性研究集中于树种、林型和凋落物等。大尺度的如北京地区森林燃烧性^[8],黑龙江省4种常见针叶树红松(*Pinus koraiensis*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)的树皮、枯落叶燃烧性^[9],吉林省17个主要森林类型红松、落叶松、云杉(*Picea asperata*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄波罗(*Phellodendron amurense*)等的燃烧性^[10],中尺度区域的如昆明地区35种森林木本植物的燃烧性^[11]、落叶灌木南烛(*Vaccinium bracteatum*)的燃烧性^[12],及9种藤本植物活叶片的燃烧性^[13],鲁中山区主要森林类型易燃可燃物垂直分布及其燃烧性^[14],阿尔泰山西伯利亚云杉纯林(*Picea obovata*)、西伯利亚冷杉纯林(*Abies sibirica*)、西伯利亚落叶松纯林(*Larix sibirica*)等8个主要林型^[15],黑龙江帽儿山地区红皮云杉(*Picea koraiensis*)、胡桃楸、黄波罗等8种乔木树种^[16],辽宁东部、西北部地区森林地被可燃物的燃烧性^[17-18],也有小尺度区域的如江西省南昌市茶园山林场乔木油茶(*Camellia oleifera*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinensis*)等8种凋落物的燃烧性^[19],昆明安宁重大森林火灾7年后火烧迹地里没有人为干扰的光叶石栎(*Lithocarpus mairei*)灌木林的燃烧性^[20],北京妙峰山林场104个小班地表可燃物燃烧性^[21]等。【本研究切入点】华山松(*Pinus armandii*)是我国西亚热带地区的山地针叶林,也是云南主要针叶树种之一,不耐寒、不耐湿热,稍耐干燥、贫瘠,在气候温凉而湿润、酸性黄壤、黄褐土壤或钙质土上,组成纯林或针阔混交林^[22]。昆明周边的华山松纯林,林相整齐,多为单层林,林分结构简单,但林内可燃物(以凋落的松针和枯枝为主)积累到了一定的水平。尤其是枯枝,干燥,垂直连续性好,密集,是地表火蔓延成树冠火的重要介质,一旦地表着火,枯枝很快被引燃,垂直蔓延到树冠,形成树冠火。【拟解决的关键问题】通过野外调查采集可燃物和在实验室的燃烧床内进行试验,测定可燃物的火行为燃烧特征,包括点着时间、火焰维持时间、无焰燃烧维持时间、蔓延时间,火焰高度、长度,火焰温度、无焰燃烧温度,火焰热辐射、无焰燃烧热辐射等,明确华山松枯枝的燃烧性,及时掌握并合理评估森林可燃物能量变化和燃烧性特征。

1 研究地概况

云南森林自然中心为云南省林草局直属生态公益型林场,位于25°04'~25°11'N, 102°43'~102°53'E,管护着昆明东北郊国有林,包括长虫山、摩天岭、石关、三尖山、圆宝山、双乳山和平顶山7个林区^[23],总面积1 885 hm²,有林地面积1 671.6 hm²,占88.7%,活立木总蓄积10.14万 m³,森林覆盖率达94.9%,其中,华山松林面积约为725 hm²,约占全中心有林地的43.37%,蓄积量101 240 m³,约占总蓄积量的46.74%。海拔最低点1 965 m,最高点2 458 m,年平均气温12.3℃,年平均降水量1 190.0 mm,5—10月为雨季,降水量约占全年88%,11月到次年4月为干季,全年无霜期约250 d^[24]。常见植物163科,923种,乔木树种主要有华山松、云南松(*Pinus yunnanensis*)、冲天柏(*Cupressus duclouxiana*)、云南油杉

(*Keteleeria evelyniana*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、银荆(*Acacia dealbata*)等,灌木主要有乌鸦果(*Vaccinium fragile*)、小铁仔(*Mysine africana*)、牛筋条(*Dichotomanthus tristaniaecarpa*)、爆仗杜鹃(*Rhododendron spinuliferum*)、火把果(*Pyracantha fortuneana*)、矮杨梅(*Myrica cheval*)等,常见草本植物有紫茎泽兰(*Eupatorium adenophora*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、毛茛苞豆(*Shuteria pampaniniana*)、刚莠竹(*Microstegium ciliatum*)、金茅(*Eulalia speciosa*)和竹叶草(*Oplismenus compositus*)等^[25]。

石关、摩天岭林区、圆宝山3个林区在昆明市松华坝水库水源保护区内,属于生态公益林区。2010年初石关林区发生过一起森林火灾,过火面积约56 hm²。由于7个林区大多在昆明城市面山,其地理位置、生态保护功能等极其重要。但林区分散不连片,林农交错,节假日市民进山旅游、拾菌子,清明节上坟的人数较多,火源管理难度大,森林防火任务艰巨。

2 研究方法

2.1 外业调查

2016年12月20日至25日(云南的森林防火期从12月1日开始至翌年6月15日)在云南森林自然中心林区内连续分布且具有代表性的华山松纯林设置长期固定样地,分别是:长虫山1个10 m×10 m样地,摩天岭2个10 m×10 m样地,圆宝山2个20 m×30 m样地。

2018年1月17日(连旱天数8 d)到长虫山、摩天岭林区,3月18日(连旱天数12 d)至三尖山、圆宝山林区,4月13日(连旱天数10 d)去长虫山、摩天岭、石关林区外业调查。在已设置的样地内测所有胸径大于5 cm的树高、枝下高、胸径和株数,估算郁闭度等林分因子,计算林分密度。沿着每个样地的对角线上,设置3个1 m×1 m的小样方,共有15个小样方。采集小样方内胸径大于5 cm活树2 m以下的枯枝,用密封袋装好,称重。枯枝取样后用便携式电子天平称其鲜质量,装袋备用。

2.2 实验室主要燃烧性参数测定

2.2.1 绝对含水率和载量 所有样品放入101型电热鼓风干燥箱中,在105℃下,连续烘干24 h至绝干状态,计算绝对含水率(%)^[26],计算可燃物的载量(kg/m²)。

$$\text{绝对含水率} = (\text{湿重} - \text{干质量}) / \text{干质量} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{可燃物载量} = \text{样方内可燃物的干质量} / \text{样方面积} \quad (2)$$

2.2.2 可燃物热值 用XRY-1C微机氧弹式量热仪,采用量热值法测热值^[27]。计算公式为:

$$Q = \frac{k[(T - T_0) + \Delta t]}{G} \quad (3)$$

式中:Q-预测可燃物的发热量(kJ/kg);k为水当量(kJ/℃);T₀为点燃前的温度(℃);T为点燃后的温度(℃);Δt为温度校正值(℃);G为样品质量(g)。

2.2.3 灰分含量 采用干灰化法^[28],过60目筛的样品在箱式电阻炉(马弗炉)中850℃灰化5 h,称其灰分质量。计算公式为:

$$\text{灰分含量} = \text{灰分质量} / \text{烘干样品质量} \times 100\% \quad (4)$$

2.3 燃烧火行为实验

图1为实验室内设置铁质燃烧床,燃烧床长203 cm,宽127 cm,高34 cm,底部覆盖一层2 cm厚的石膏板,防止散热,坡度设为10°(野外华山松纯林可燃物的状态),模拟无风状态下的燃烧。在燃烧床四个角设置4根标杆,以每个刻度10 cm标记,最高200 cm,火线达到最高火焰时测火焰高度^[28]。将野外样方内采集的枯枝平整铺放在燃烧床内,面积为1 m×1 m,用气体点火器点火,用秒表记录有焰燃烧时间、无焰燃烧时间,用钢卷尺测火焰高度(cm)、红外测温仪

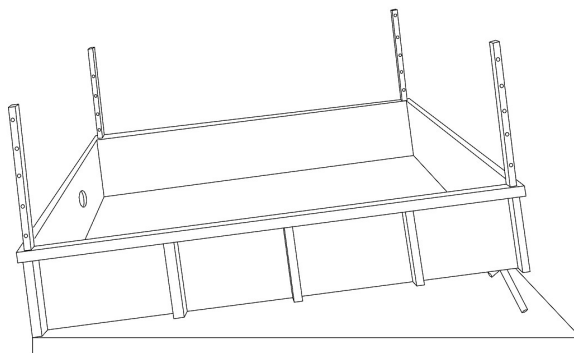


图1 自制燃烧床

Fig.1 Homemade burning bed

SL-309测火焰温度(℃)、无焰燃烧温度(℃)、SFR-Ⅲ数字式辐射热计测火焰辐射(kw/m²)、无焰燃烧辐射(kw/m²)。

2.4 数据处理

用Excel2015和SPSS18.0对数据进行处理,分别计算平均值、标准差等。

3 结果与分析

3.1 华山松纯林的林分特征

云南森林自然中心的华山松纯林主要连续分布在圆宝山、长虫山、摩天岭等3个林区。从海拔高度、坡度、树龄、郁闭度和密度等都具有典型性和代表性(表1)。华山松纯林主要分布在1 900~2 210 m,坡度为10°~25°,平均年龄28 a,为同龄林,平均树高大于6.8 m,平均胸径大于9.8 cm,平均枝下高大于1.5 m。林分因子都相似,郁闭度都大于0.7,最近5年没有人工抚育更新,密度较大,最低为2 550株/hm²,最高接近3 800株/hm²。华山松纯林基本没有混生灌木,林内草本植物很少,林下可燃物只有凋落物和枯枝,有自然稀疏的枯死树。华山松纯林的枝下高不足2 m,可燃物垂直方向连续性好,一旦发生火灾,极有可能发展为树冠火。

表1 云南森林自然中心华山松纯林的林分特征
Tab.1 Stand characteristics of *Pinus armandii* Forest in Yunnan natural centre of forestry

林区 Forest area	海拔/m Altitude	坡度/° Slope	平均树高/m Average height of tree	平均胸径 DBH/cm Average diameter of breast	平均枝下高/m Average height of branch	郁闭度 Canopy closure	密度/ (株·hm ⁻²) Density	样方数 Samples
长虫山 Changchong mountain	2 100	15	7.5	10.6	1.5	0.7	2 550	3
摩天岭 Motianling	2 210	10	6.8	9.8	1.9	0.8	3 733	6
圆宝山 Yuanbao mountain	1 970	15	9.2	11.6	1.6	0.7	2 650	6

3.2 华山松纯林枯枝的燃烧物理特征

3.2.1 枯枝含水率和载量 可燃物含水率表征可燃物水分多少,即干、湿程度,是影响林火发生、发展最重要因子之一,影响到可燃物达到点着温度的时间和热量的释放^[29]。可燃物的含水率小于10%时,可燃物能被快速引燃,且火蔓延迅速。

表2 云南森林自然中心华山松纯林枯枝的物理特征
Tab.2 Physic characteristics of dead branches of *Pinus armandii* forest in Yunnan natural centre of forestry

林区 Forest area	含水率/% Moisture content	载量/(kg·m ⁻²) Fuel load	点着温度/℃ Ignition temperature	灰分含量/% Ash content	热值/(kJ·kg ⁻¹) Heat values
长虫山 Changchong mountain	14.61±1.05	0.35±0.09	274	6.89	18 812
摩天岭 Motianling	12.99±1.11	0.38±0.19	285	7.74	17 291
圆宝山 Yuanbao mountain	7.37±1.40	0.13±0.04	279	5.32	17 579

防火期内,尤其在防火紧要期,云南森林自然中心未人工抚育过的华山松纯林的枯枝含水率非常低,长虫山的凋落物的平均含水率为14.61%,摩天岭为12.99%,圆宝山为7.37%(表2),处于非常干燥的状态,很容易引燃,一旦着火,蔓延迅速,扑救难度大。可燃物的载量直接影响着火速度、蔓延快慢和火强度大小。载量的多少,取决于凋落物的累积和分解速度,与植被类型和环境条件有关,并随时间

和空间而动态变化。表2载量的差异非常明显,长虫山、摩天岭和圆宝山的枯枝平均载量分别为 0.35 g/m^2 、 0.38 kg/m^2 和 0.13 kg/m^2 。枯枝在树上垂直分布连续,是地表火转变为树冠火衔接的一种良好介质,为易燃和极易燃状态,一旦发生森林火灾,枯枝将会是蔓延为树冠火的关键。

3.2.2 点着温度和灰分含量 点着温度即着火点,用来衡量可燃物着火的难易程度。灰分是可燃物完全燃烧后剩下的无机元素的统称,包括钠、钾、镁、钙、磷等,灰分物质含量越高,可燃物就越难燃。许多灰分元素具有阻燃作用,对燃烧有明显的影响,它们增加木炭的生成和减少焦油的形成,可降低火焰的活动,限制有焰燃烧和火蔓延的速度^[28]。

长虫山、摩天岭、圆宝山华山松纯林枯枝的点着温度分别为 $274\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $285\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $279\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表2),灰分含量分别为 6.89% 、 7.74% 和 5.32% 。3个林区华山松纯林枯枝的点着温度和灰分含量差别都不大,因为华山松基本处于同一环境中,对矿物质元素的选择吸收和累积的差异不大。

3.2.3 热值 热值是单位质量可燃物完全燃烧所释放的热量,不同森林可燃物的热值差异很大,是评价火强度、能量传递、蔓延状态等的依据^[27],影响着火温度和火的蔓延过程。

长虫山、摩天岭和圆宝山华山松枯枝的热值为 $18\ 812$ 、 $17\ 291$ 、 $17\ 579\text{ kJ/kg}$ (表2)。如果发生森林火灾,这些可燃物将释放大量的热量,为未燃的可燃物和空气提供热量,恶化扑火人员的灭火环境。

3.3 华山松枯枝的燃烧性

3.3.1 引燃时间和辐射热 华山松枯枝的引燃时间为 $3.5\sim 4.1\text{ s}$ (表3),处于干燥状态,极易燃烧,只要有点火源就能燃烧。长虫山、摩天岭的热辐射为 3.36 kw/m^2 和 2.85 kw/m^2 ,圆宝山的枯枝热辐射最大,达到 4.25 kw/m^2 。在林火蔓延初期,热辐射预热了火焰前方未被点燃的可燃物,使燃烧更连续。

表3 云南森林自然中心华山松纯林枯枝的燃烧参数

Tab.3 Combustion parameters of dead branches of *Pinus armandii* forest in Yunnan natural centre of forestry

林区 Forest area	火焰温度/ $^{\circ}\text{C}$ Flame Temperature	火焰高度/cm Flame height	火焰维持时间/min Holding time of flame	热辐射/ $(\text{kw}\cdot\text{m}^{-2})$ Heat radiation	引燃时间/s Ignition time	烧损率/% Burn loss rate
长虫山 Changchong mountain	557	55	9.2	3.36	4.0	71.35
摩天岭 Motianling	578	42	16.9	2.85	4.1	70.56
圆宝山 Yuanbao mountain	546	74	8.9	4.25	3.5	78.38

3.3.2 有焰燃烧特征 有焰燃烧是可燃物挥发出足够可燃性气体的燃烧,能看到明亮火焰,同时释放出大量热,也称明火^[7]。有焰燃烧速度快,直接扑救危险大。火焰是燃料和空气混合后迅速转变为燃烧产物过程中出现的可见光或其他表现形式,是放热反应中反应区周边空气分子加热而高速运动,从而发光的状态或现象^[30]。火焰是随意的、动乱的且不断变化。火焰高度在灭火行动中较容易观测,可用来计算火强度,也是扑火指挥员选择灭火手段的主要依据之一。

可燃物的垂直连续性在地表火向树冠火转换中起到决定性作用^[31]。长虫山、摩天岭和圆宝山华山松纯林枯枝的火焰维持时间都大于 8.9 min ,平均火焰高度都大于 42 cm (表3),在实验中摩天岭枯枝火焰高度可达到 42 cm ,而圆宝山的最高火焰高度更达到了 74 cm 。在野外,一旦地表火蔓延到枯枝,枯枝能轻易把火焰蔓延到树冠,形成树冠火。

枯枝的火焰温度都高于 $546\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表3),远远超出了灭火队员所能承受的极限,也能快速引燃别可燃物,加速林火蔓延。烧损率是燃烧消耗的可燃物与烧前可燃物的比例,用来表征燃烧效率。枯枝的烧损率都高于 70% ,可见枯枝燃烧效率较高,也将释放出更多能量。

3.3.3 无焰燃烧特征 无焰燃烧指燃烧时不能挥发出足够可燃气体,没有明亮火焰的现象,也叫暗火,燃烧速度缓慢,但持续时间长,不易被发现和扑灭,易产生复燃^[7]。无焰燃烧维持时间平均超过 30 min 。在野外,大量的腐殖质,会导致其明火燃烧后无焰燃烧时间更长。无焰燃烧温度都在 $347\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,热辐射大

于 2.9 kw/m²(表 4),这也说明燃烧结束或者人工扑灭明火以后,还会存在较大的复燃几率,增加了森林火灾扑救的难度。

表 4 云南森林自然中心华山松纯林枯枝的无焰燃烧特征
Tab.4 Flameless combustion characteristics of dead branches of *Pinus armandii* forest in Yunnan natural centre of forestry

林区 Forest area	无焰燃烧温度/℃ Temperature of flameless combustion	无焰燃烧热辐射/(kw·m ⁻²) Heat radiation of flameless combustion	无焰燃烧维持时间/min Maintenance time of flame- less combustion
长虫山 Changchong mountain	452	3.21	26
摩天岭 Motianling	347	2.98	36
圆宝山 Yuanbao mountain	374	4.14	30

4 结论与讨论

防火期内,云南森林自然中心林区华山松纯林枯枝的含水率极低,为 7.37%~14.61%,平均载量为 0.13~0.38 kg/m²,虽然载量小,但枯死的凋落物连续、紧密的分布在华山松纯林地下空间,一旦着火,极易燃烧蔓延至其他地上可燃物和含水率极低的树上枯枝。枯枝是良好的垂直方向的介质,火沿着枯枝蔓延至树冠,形成树冠火。枯枝的点燃时间极短大约为 4 s 左右,处于极易引燃状态,明火燃烧时间超过 3.5 min,最高火焰高度达到了 74 cm。含水率和火焰高度是最重要的参数,一旦着火,树上的枯枝很快引燃,成为高效过火媒介,很可能发生树冠火。这与李世友等^[31]提出的预防昆明周边华山松树冠火的最低修枝高度很接近。

本文从森林燃烧角度研究了防火期内火环境下华山松纯林枯枝的燃烧性。含水率、热值、灰分含量等的测定、载量的计算以及引燃、有焰、无焰燃烧特征的观测,能更科学、合理评估燃烧性,为更好预防森林火灾提供理论依据,为昆明周边的林火管理提供理论支撑。

可燃物野外的燃烧、蔓延受到诸多因素影响,火行为非常复杂,如何更好模拟野外燃烧状态,值得继续探索。可燃物自身的空间异质性,特别是枯立木,对森林燃烧性也有一定影响。在野外,随着华山松纯林的自然更新,林下可燃物的量将积累到一定程度,将会释放更多的能量,同时,由于地表特别是树上的枯枝,地表火焰能轻易引燃枯枝,顺着枯枝蔓延到树冠,形成树冠火。需要采取相应措施对可燃物进行科学管理,如在非防火期允许当地老百姓收集一定量的凋落松针、小枯枝等用于中药材三七的栽培,清理树上的枯枝,减少梯状可燃物的连续性,有计划清除枯立木,降低树冠火的风险,或有预案地进行华山松林抚育更新。

参考文献:

[1] 张家来,曾祥福,胡仁华,等.湖北主要森林可燃物类型及潜在火行为研究[J].华中农业大学学报,2002,21(6): 550-554.
Zhang J L,Zeng X F,Hu R H,et al.Study on the type of forest fuel and the latent fire behavior in Hubei Province [J].Journal of Huazhong Agricultural University,2002,21(6):550-554.

[2] 王明玉,舒立福,赵凤君,等.北京西山可燃物特点及潜在火行为[J].林业科学,2010,46(1):84-90.
Wang M Y,Shu L F,Zhao F J,et al.Characteristics of forest fuel and potential fire behavior in Xishan Mountain of Beijing [J].Scientia Silvae Sinicae,2010,46(1):84-90.

[3] Martin D L,Manuel J B,José Raventós,et al.Fuel characteristics and fire behavior in mature Mediterranean gorse shrub-lands[J].International Journal of Wildland Fire,2004,13:79-87.

[4] Lara A.A,Cristina P,et al.Fire models and methods to map fuel types: the role of remote sensing[J].Forest Ecology and Management 2008,(256):1239-1252.

- [5] 王秋华,俞新水,李世友,等.森林可燃物的动态特征研究综述[J].林业调查规划,2012,37(5):40-43.
Wang Q H, Yu X S, Li S Y, et al. Study on dynamic characteristics of forest fuel[J]. Forest Inventory and Planning, 2012, 37(5):40-43.
- [6] 舒立福,田晓瑞,徐忠忱.森林可燃物可持续管理技术理论与研究[J].火灾科学,1999,8(4):18-24.
Shu L G, Tian X R, Xu Z C. The research and application of the sustainable management technique of forest fuel[J]. Fire Safety Science, 1999, 8(4):18-24.
- [7] 舒立福,刘晓东.森林防火学概论[M].北京:中国林业出版社,2016:20-41.
Shu L F, Liu X D. The generality of forest fire prevention[M]. Beijing: The Press of Chinese Forest, 2016:20-41.
- [8] 田晓瑞,舒立福,阎海平,等.北京地区森林燃烧性研究[J].森林防火,2004,(1):23-24.
Tian X R, Shu L F, Yan H P, et al. Combustibility of forest in Beijing [J]. Forest Fire Prevention, 2004, (1):23-24.
- [9] 彭徐剑,鞠琳,胡海清.黑龙江省4种针叶树的燃烧性[J].东北林业大学学报,2014,42(1):71-75.
Peng X J, Ju L, Hu H Q. Fire resistance of four coniferous woody species in Heilongjiang Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(1):71-75.
- [10] 周勇,章林,王晓娜,等.吉林省主要森林类型地表凋落物燃烧性分析[J].森林防火,2017(1):16-21.
Zhou Y, Zhang L, Wang X N, et al. Analysis of combustibility of ground litter of main forest types in Jilin province [J]. Forest Fire Prevention, 2017(1):16-21.
- [11] 李世友,马长乐,罗文彪,等.昆明地区35种森林木本植物的燃烧性排序与分类[J].生态学杂志,2008,27(6):867-873.
Li S Y, Ma C L, Luo W B, et al. Combustibility ordering and sorting of 35 woody plant species in Kunming area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(6):867-873.
- [12] 李世友,王少名,年有春,等.落叶灌木南烛在防火戒严期的燃烧性动态[J].江西农业大学学报,2008,30(5):845-849.
Li S Y, Wang S M, Nian Y C, et al. Combustibility dynamics of deciduous bush plant *Lyonia ovalifolia* during the prohibitive period of forest fire [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2008, 30(5):845-849.
- [13] 苏文静,张思玉,何诚,等.昆明地区9种藤本植物活叶片的燃烧性[J].林业资源管理,2017(6):120-123.
Su W J, Zhang S Y, He C, et al. Combustion characteristics of live leaves of 9 lianas species in Kunming, Yunnan Province [J]. Forest Resource Management, 2017(6):120-123.
- [14] 解国磊,丁新景,马风云,等.鲁中山区主要森林类型易燃可燃物垂直分布及其燃烧性[J].西北林学院学报,2016,31(1):158-163.
Xie G L, Ding X J, Ma F Y, et al. Vertical distribution of the forest flammable fuel loads and combustion of the main forest types in mountainous area of Shandong [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1):158-163.
- [15] 包艳丽,牛树奎,孙国庆,等.阿尔泰山主要林型燃烧性研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(4):134-137.
Bao Y L, Niu S K, Sun G Q, et al. The combustibility about major forest types in Altay mountains [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4):134-137.
- [16] 李艳芹,胡海清,冯仲科.帽儿山地区几种乔木树种燃烧性研究[J].北京林业大学学报,2010,32(4):22-25.
Li Y Q, Hu H Q, Feng Z K. Flammability of several tree species in the maoye mountain area, Northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4):134-137.
- [17] 高国平,王月.辽宁东部地区森林地被可燃物及其燃烧性的研究[J].沈阳农业大学学报,2004,35(1):24-28.
Gao G P, Wang Y. Combustible ground cover and combustibility of forest in Eastern Liaoning [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(1):24-28.
- [18] 王月,高国平,周绍砚,等.辽宁西北部地区森林地被可燃物及其燃烧性的研究[J].沈阳农业大学学报,2006,37(5):716-719.
Wang Y, Gao G P, Zhou S Y, et al. Combustible ground cover and combustibility of forest in Northwest Liaoning Province [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2006, 37(5):716-719.
- [19] 王舜尧,金森.基于热重分析的南昌地区8种可燃物的热解动力学及燃烧性排序[J].中南林业科技大学学报,2015,35(11):94-98.
Wang S R, Jin S. Study on pyrolysis kinetics and combustibility ordering of 8 kinds of fuels in Nanchang area based on Thermogravimetric analysis [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(11):94-98.

- [20] 王秋华,肖慧娟,徐盛基,等.滇中安宁“3·29”重大森林火灾火烧迹地灌木林的燃烧性研究[J].安全与环境学报,2016,16(1):138-141.
- Wang Q H, Xiao H J, Xu S J, et al. Retrogressive study and analysis of the burning features of the shrubs in the fire taking place on 29 March, 2006, in Anning, Yunnan[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 138-141.
- [21] 李连强,牛树奎,陈锋,等.北京妙峰山林场地表潜在火行为及燃烧性分析[J].北京林业大学学报,2019,41(3):58-67.
- Li L Q, Niu S K, Chen F, et al. Analysis on surface potential fire behavior and combustion of Miaofeng Mountain Forest Farm in Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(3): 58-67.
- [22] 云南森林编写委员会,云南森林[M].云南科技出版社:昆明/中国林业出版社:北京,1984:115-118.
- The Compile Committee of Yunnan Forestry, Yunnan Forest [M]. The Press of Yunnan science and technology: Kunming, the Press of Chinese forest: Beijing, 1984: 115-118.
- [23] 刘代亿,曾琳,任仕伟,等.云南森林自然中心森林资源现状分析与评价[J].林业调查规划,2017,42(1):80-84.
- Liu D Y, Zeng L, Ren S W, et al. Analysis and evaluation of the forest resources status of Yunnan Forest Nature Center[J]. Forest Inventory and Planning, 2017, 42(1): 80-84.
- [24] 韩永涛,叶彪,单保君,等.昆明面山森林防火现状与对策研究:以云南森林自然中心为例 [J].森林防火,2017(2):20-23
- Han Y T, Ye B, Shan B J, et al. The current situation and management of forest prevention in Kunming city, for example of Yunnan centre of nature forest[J]. Forest Fire Prevention, 2017(2): 20-23.
- [25] 李眉慧.云南森林自然中心防火林带设计[J].森林防火,2002(1):28-30.
- Li M H. Design of fire belts in Yunnan centre of nature forest [J]. Forest fire prevention, 2002(1): 28-30.
- [26] 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 behave plus model[J]. Jour of Zhejiang For Sci & Tech, 2013, 33(4): 43-48.
- [27] 王小雪,彭徐剑,胡海清.黑龙江省主要草本可燃物燃烧性分析 II:燃烧性综合评价[J].中南林业科技大学学报,2013,33(6):1-6.
- Wang X X, Peng X J, Hu H Q. Analysis of combustibility of major herb species in Heilongjiang Province II: comprehensive evaluation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(6): 1-6.
- [28] 王小雪,彭徐剑,胡海清.黑龙江省主要草本可燃物燃烧性分析 I:灰分含量及燃烧速度[J].中南林业科技大学学报,2013,33(5):6-10.
- Wang X X, Peng X J, Hu H Q. Combustibility analysis of inflammable matters of major herb species in Heilongjiang province I: ash content and burning velocity [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(5): 6-10.
- [29] 满子源,胡海清,张运林,等.帽儿山地区典型地表可燃物含水率动态变化及预测模型[J].北京林业大学学报,2019,41(3):49-57.
- Man Z Y, Hu H Q, Zhang Y L, et al. Dynamic change and prediction model of moisture content of surface fuel in Maoer Mountain of Northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(3): 49-57.
- [30] 骆介禹,森林燃烧能量学[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,1992:165-170.
- Luo J Y. Forest combustion energetic [M]. Harbin: The Press of Northeast Forestry University, 1992: 165-170.
- [31] 李世友,刘会龙,张凯,等.预防华山松树冠火的最低修枝高度探讨[J].华中农业大学学报,2009,28(3):361-364.
- Li S Y, Liu H L, Zhang K, et al. The lowest pruning heights of preventing crown fire of *Pinus armandii* trees [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(3): 361-364.