

## 川西地区常见森林类型枯落物燃烧性状差异分析

刘韩<sup>1</sup>, 李淑婷<sup>2</sup>, 吴富雨<sup>1\*</sup>, 兰常军<sup>3</sup>, 崔兴雷<sup>2,4</sup>, 郑江坤<sup>2,4</sup>, 侯贵荣<sup>2,4</sup>

(1. 甘孜藏族自治州林业科学研究所, 四川康定 626001; 2. 四川农业大学林学院, 四川成都 611130; 3. 峨边彝族自治县毛坪镇人民政府下属事业单位农业综合服务中心, 四川乐山 614307; 4. 国家林业草原西南森林与草原生态防火工程技术研究中心, 四川成都 611130)

**摘要** [目的]研究川西地区常见森林类型枯落物的燃烧性状, 评估不同森林类型发生地表火的风险及强度。[方法]选取川西地区常见的6种森林类型, 分别测定了其枯落物的含水率、灰分、燃点、干重热值(GCV)、去灰分热值(AFCV); 利用主成分分析, 综合评价了不同森林类型枯落物的燃烧性差异。[结果]不同森林类型之间, 枯落物的含水率、燃点、GCV、AFCV有差异。通过综合分析, 将川西地区6种常见森林类型枯落物的燃烧性进行排序, 从高到低为辐射松>高山松>高山栎>华山松>云南松>云杉-冷杉混交林。[结论]对川西地区常见森林类型林下枯落物的燃烧性进行测定分析, 有助于预测不同森林类型发生地表火的风险和强度, 同时可为火灾预防提供参考。

**关键词** 枯落物; 燃烧性状; 主成分分析; 川西林区

中图分类号 S762.1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)24-0097-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.021



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Analysis of the Variation in Burning Characteristics of Litters from Different Forest Types in Western Sichuan**LIU Han<sup>1</sup>, LI Shu-ting<sup>2</sup>, WU Fu-yu<sup>1</sup> et al (1. Forestry Science Research Institute of Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture, Kangding, Sichuan 626001; 2. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130)

**Abstract** [Objective] To study the burning characteristics of litters from different common forest types in west Sichuan can help assess the risk and intensity of surface fires in different forest types. [Method] Six common forest types in the western Sichuan region were selected and their litter moisture content, ash content, ignition point, dry weight calorific value (GCV), and ash free calorific value (AFCV) were measured. By using principal component analysis, the variation in burning characteristics across different forests were comprehensively evaluated. [Result] The results showed that the differences in moisture content, ignition point, gross calorific value (GCV), and ash-free calorific value (AFCV) were significant among different forest types. Through comprehensive analysis, the flammability of litters from six common forest types in western Sichuan was ranked as follows: *Pinus radiata* > *Pinus densata* > *Pinus armandii* > *Quercus semicarpifolia* > *Pinus yunnanensis* > *Picea asperata* - *Abies fabri*. [Conclusion] In this study, we measured and analyzed the burning characteristics of litters from six common forest types in western Sichuan. Our study can help predict the risk and intensity of surface fires in different forest types, and provide references for fire prevention.

**Key words** Litter; Flammability; Principal component analysis; West Sichuan region

近年来,受气候变化和人类活动的影响,森林火灾已经成为难以解决的全球性问题<sup>[1-3]</sup>。森林火灾是一种突发性强,能对森林产生严重影响的自然灾害,同时还会造成严重的经济损失和生态破坏<sup>[4-5]</sup>。森林火灾通常分为地表火、树冠火和地下火,其中地表火在森林火灾中发生率最高,约占90%以上<sup>[6]</sup>。而地表火在有连续的“阶梯燃料”的情况下,会变成严重的树冠火<sup>[7-8]</sup>。

燃料是森林火灾发生的三要素之一,其直接影响森林火灾的强度、蔓延速度和发生火灾的风险<sup>[9-13]</sup>。森林可燃物主要包括植物活体和枯枝落叶及其他有机物,其中枯枝落叶层,由于含水率低,更易被点燃<sup>[14-17]</sup>。不同森林类型中,可燃物质的物理化学性质有明显差异,其燃烧的难易程度也有所不同<sup>[18]</sup>。通过测量含水率、燃点、热值和灰分等燃烧特征,可以间接评价不同可燃物的燃烧性能<sup>[19]</sup>。很多学者通过测量这些理化性质来评价森林可燃物的燃烧性能。如张恒等<sup>[20]</sup>根据树种的理化性质对内蒙古地区主要乔木树种抗火性进行了研究,并运用主成分分析法及对主要树种的抗火性值进行排序,以筛选强抗火性树种;祝必琴等<sup>[21]</sup>对亚热带季

风区不同林型树种的可燃物理化性质及燃烧性进行研究,得出含水率、灰分含量、抽提物含量等理化性质对不同林型的燃烧性有重要影响;王明霞等<sup>[22]</sup>以吉林省蛟河11种主要树种树皮为研究对象,根据含水率、灰分、热值等指标,使用熵权法、方差分析、聚类分析等方法对各树种树皮抗火性进行综合评价。

四川省是森林火灾发生比较频繁、受灾情况比较严重的省份,其中川西地区是森林火灾的高发区<sup>[23]</sup>。为了评价川西地区常见森林类型的火灾危险性和火灾强度,笔者收集了该地区6种常见针叶林凋落物样本(针叶林的地表可燃物更易被引燃,更易发生森林火灾),通过测量凋落物的含水率、燃点、热值和灰分含量,评估了不同森林凋落物的燃烧特性,并综合分析了不同森林类型间凋落物的燃烧性差异,有助于预测不同森林类型发生地表火的风险和强度,同时可为火灾预防提供参考。

**1 材料与方法**

**1.1 研究区概况** 取样点分布于四川省甘孜藏族自治州(97°22'~102°29' E, 27°58'~34°20' N),平均海拔3 500余m<sup>[24]</sup>。该地区大部分区域年均气温在10℃以下,光照强,日照充足,旱季分明,冬寒冬干,少雨少风,年降水量在347~922 mm,森林火灾发生较为频繁。甘孜地区树种丰富,但就其在森林中的群落建设作用而言,主要集中在松科、柏科、壳

**基金项目** 甘孜州地方财政资金项目“甘孜州林下可燃物载量调查及森林火灾风险管理研究”。**作者简介** 刘韩(1983—),女,四川金堂人,高级工程师,硕士,从事森林保护和林业生态研究。\*通信作者,工程师,硕士,从事林木遗传育种工作。**收稿日期** 2022-11-10

斗科、桦木科、杨柳科、胡桃科等<sup>[25]</sup>。

**1.2 试验材料** 该研究选取高山栎 (*Quercus semicarpifolia*)、高山松 (*Pinus densata*)、冷杉-云杉混交林 (*Abies fabri-Picea asperata*)、云南松 (*Pinus yunnanensis*)、辐射松 (*Pinus radiata*)、华山松 (*Pinus armandii*) 6 种川西地区常见森林类型的枯落物作为研究对象。样品于 2021 年 5—6 月采集 (表 1)。

表 1 样品采集信息

Table 1 The information of sample collection sites

树种名称 Tree species	海拔 Altitude//m	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	坡度 Slope// (°)	坡向 Slope orientation	郁闭度 Canopy closure
高山栎 <i>Pinus armandii</i>	3 249	101°11'57.10"	30°04'07.54"	33	南	0.80
高山松 <i>Pinus densata</i>	2 930	101°03'46.05"	30°12'53.03"	16	东北	0.45
云杉-冷杉 <i>Picea asperata-Abies fabri</i>	3 713	100°54'37.14"	29°58'54.85"	32	北	0.50
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	1 765	102°11'09.02"	29°42'59.59"	32	东	0.60
辐射松 <i>Pinus radiata</i>	1 618	102°13'49.00"	29°55'56.00"	22	西	0.50
华山松 <i>Quercus semicarpifolia</i>	2 453	102°14'38.00"	29°50'12.00"	40	东南	0.85

**1.3 试验方法** 将外业采集的样品带回实验室,参照《森林可燃物的测定》(LY/T2013—2012)对热值、燃点、含水率、灰分 4 项理化性质指标进行测定。

**1.3.1 含水率的测定。**将样品收集后立即称重,带回实验室后放入烘箱烘干 48 h,再次称重,再将样品放入烘箱 30 min,若所称得的干重与第一次测量的结果误差在 0.000 2 g 范围内,则认为样品恒重,记录样品干重。根据干湿重对样品含水率进行计算:

$$\text{含水率} = \frac{\text{烘干前重量(g)} - \text{烘干后重量(g)}}{\text{烘干前重量(g)}} \times 100\%$$

**1.3.2 燃点的测定。**燃点即可燃物着火时的温度。样品于 65 °C 烘干至恒重后取出,用粉碎机粉碎,过 40 目筛 (0.45 mm)。测定前和亚硝酸钠提前放置在烘箱内,保证测量时绝对干燥。准确称取干燥后的可燃物样品 (0.100 ± 0.001) g,加入亚硝酸钠粉末 (0.075 ± 0.001) g,并使样品与亚硝酸钠充分混合。利用点着温度测定仪 (TYRD-6A) 进行测定。每个样品重复测定 3 次。

**1.3.3 热值的测定。**热值即单位质量的森林可燃物燃烧所放出的热量,分为干重热值 (GCV) 和去灰分热值 (AFCV) 2 种类型<sup>[18,26]</sup>。采用量热仪的水当量法测定。将烘干至恒重的样品在粉碎机中粉碎,过 15 目筛 (1.35 mm)。测量前提前放入烘箱内烘干,以保证测定时绝对干燥,准确称量 (0.500 ± 0.001) g 可燃物样品至燃烧皿内,然后利用微机全自动量热仪 (ZDHW-9) 进行测定。每个样品重复测定 3 次。

$$\text{AFCV} = \frac{\text{GCV (kJ/kg)}}{1 - \text{灰分 (kJ/kg)}}$$

**1.3.4 灰分的测定。**采用干灰化法。分别称取 1 g 粉碎后的样品放入坩埚中,放在电炉上进行碳化,直至样品燃烧到不再冒烟;再将碳化后的样品连同坩埚冷却后放入 650 °C 左右的马弗炉进行灰化约 4 h,30 min 后称重。通过原重量减去灰分含量,即可得出有机物含量。每个样品重复测定 3 次。

$$\text{灰分} = \frac{\text{灼烧后剩余物重量(g)}}{\text{取样重量(g)}} \times 100\%$$

样品采集时,利用机械布点法在不同林型下各设置 3 个固定标准样地,每个样地大小为 20 m × 20 m,样地边界远离林缘 50 m 以上。在大样地内沿对角线布设 3 个 1 m × 1 m 小样方。收集样方内所有地表枯落物,并进行标记、称重,然后封装带回实验室。

$$\text{有机物含量} = 1 - \frac{\text{灼烧后剩余物重量(g)}}{\text{取样重量(g)}} \times 100\%$$

**1.4 数据处理** 试验数据通过 Excel 2019 整理后,利用 Origin 2021 作图,并采用 SPSS 27 进行方差分析和主成分分析。主成分分析方法是一种将多个变量进行正交变换转化为少数几个重要的具有代表性的新的变量的多元统计方法。通过信息贡献率的多少对多个影响因子进行综合评价。该研究按照累计贡献率达到 90% 的原则,再根据样本的因子得分和主成分贡献率代入式 (1) 得出综合指标 Y 值,通过对该值进行排序,可在原有信息的基础上最大限度地揭示各森林类型枯落物的燃烧性强弱<sup>[20]</sup>。

$$Y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_mx_m \quad (1)$$

式中:  $m$  为不同森林类型;  $a_m$  为各主成分贡献率;  $x_m$  为个主成分因子得分。

## 2 结果与分析

**2.1 不同森林类型枯落物燃烧性状** 由表 2 可知,不同森林类型林下枯落物含水率不同,变化范围在 24.65% ~ 55.51%,其中辐射松枯落物含水率最高,为 55.51%,云杉-冷杉混交林枯落物含水率最低,为 24.65%;高山栎枯落物含水率较高,为 43.80%,高山松、云南松、华山松含水率较低,在 36.40% ~ 39.01%。6 种林分类型枯落物含水率由高到低依次为辐射松、高山栎、华山松、云南松、高山松、云杉-冷杉混交林。

热值是指可燃物燃烧释放的热量,可反映火灾发生的强度,分别对不同林分类型的 GCV 和 AFCV 进行了分析。6 种林下枯落物的 GCV 在 22.72 ~ 38.73 kJ/kg, AFCV 变化范围在 25.35 ~ 48.86 kJ/kg,其中辐射松林下枯落物 GCV 和 AFCV 均最高,云杉-冷杉混交林林下枯落物 GCV 和 AFCV 均最低;不同森林类型林下枯落物 GCV 和 AFCV 差异不显著 ( $P > 0.05$ )。6 种林分类型枯落物 AFCV 由高到低依次为辐射松、高山松、高山栎、华山松、云南松、云杉-冷杉混交林。

燃点越高即所需温度越高,越不容易燃烧,抗火性就越强。6 种林下枯落物的燃点在 147.04 ~ 267.39 °C,其中高山松林下枯落物燃点最高,为 267.39 °C,云杉-冷杉混交林下枯

落物最低,仅 147.04 °C;辐射松、云南松、华山松和 高山栎 枯落物燃点较高,均在 208.0 °C 以上。6 种 林分类型 枯落物燃

点由高到低依次为高山松、辐射松、云南松、华山松、高山栎、云杉-冷杉混交林。

表 2 不同森林类型枯落物理化性质差异

Table 2 Difference in physical and chemical properties of litter from different forest types

树种名称 Tree species	含水率 Moisture content // %	干重热值 GCV // kJ/kg	去灰分热值 AFCV // kJ/kg	燃点 Flash point // °C	灰分 Ash content // %
高山栎 <i>Pinus armandii</i>	43.80±5.86 ab	31.93±4.39 ab	35.70±6.28 ab	208.33±29.82 ab	7.66±3.47 ab
高山松 <i>Pinus densata</i>	36.40±0.90 bc	37.87±2.55 ab	40.98±2.81 ab	267.39±1.60 a	7.46±0.18 ab
云杉-冷杉 <i>Picea asperata-Abies fabri</i>	24.65±6.01 c	22.72±4.19 b	25.35±5.26 b	147.04±29.32 b	5.50±2.18 b
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	36.55±4.02 bc	31.73±4.65 ab	33.36±4.54 ab	209.64±28.72 ab	3.73±0.98 b
辐射松 <i>Pinus radiat</i>	55.51±3.99 a	38.73±1.66 a	48.86±3.89 a	266.77±4.49 a	19.40±8.56 a
华山松 <i>Quercus semicarpifolia</i>	39.01±10.92 abc	32.36±9.56 ab	35.69±8.47 ab	209.14±59.49 ab	6.60±1.61 b

注:同列不同小写字母表示树种间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different tree species ( $P<0.05$ ).

灰分指可燃物燃烧后剩余的无机物,对火灾行为的蔓延起抑制作用,与可燃性呈负相关<sup>[26]</sup>。6 种林下枯落物的灰分含量在 3.73%~19.40%,其中辐射松的灰分含量最高,达 19.40%,云南松的灰分含量最低,仅 3.73%;高山栎和 高山松灰分含量较高,均在 7.00% 以上。6 种林分类型 枯落物灰分含量由高到低依次为辐射松、高山栎、高山松、华山松、云杉-冷杉混交林、云南松。

**2.2 枯落物理化性质的相关性** GCV、AFCV 燃点和灰分是 4 种与可燃物燃烧性状密切相关的理化性质。通过对这 6 个森林类型林下枯落物的数据进行分析,发现 GCV、AFCV 与燃点呈显著正相关,即当燃点越高时,可燃物燃烧释放的热量越高;灰分与 GCV 和燃点无显著相关性,与 AFCV 呈显著正相关,即可燃物灰分含量越高,燃烧释放的 AFCV 越高(表 3)。

表 3 各理化性质间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between physical and chemical properties

指标 Index	GCV	AFCV	燃点 Flash point	灰分 Ash content
GCV	1			
AFCV	0.923 15*	1		
燃点 Flash point	0.972 23*	0.938 67*	1	
灰分 Ash content	0.238 91	0.592 56*	0.348 00	1

注: \* 表示在 0.05 水平相关显著。

Note: \* indicates a significant correlation at the 0.05 level.

**2.3 不同森林类型枯落物燃烧性能** 含水率、GCV、AFCV、燃点、灰分是与燃烧性紧密相关的理化指标,但凋落物的含水率随天气的变化而变化,而燃点、GCV、AFCV、灰分等理化性质是稳定的,由植物种类决定<sup>[27]</sup>,因此在综合分析时,未考虑含水率。灰分与燃烧性呈负相关,通过原重量减去灰分含量,即可得出有机物含量,在主成分分析中选择有机物含量作为指标。通过对 6 种森林类型林下枯落物理化性质进行主成分分析(图 1),前 2 个新变量的累计贡献率达到 99.69%,超过了 90%(表 4),表明这 2 个变量包含了原始变量中的绝大部分信息,具有代表性,而剩余的一个变量贡献率只有 0.31%,影响较小。因此,前 2 个新变量可作为综合评

价燃烧性能的新复合指标。GCV、AFCV 和燃点在主成分 1 上具有较高的荷载值,主成分 1 可作为 3 个指标的复合指标;有机物含量在主成分 2 上具有较高的荷载值,主成分 2 可单独作为有机物的指标(表 5)。

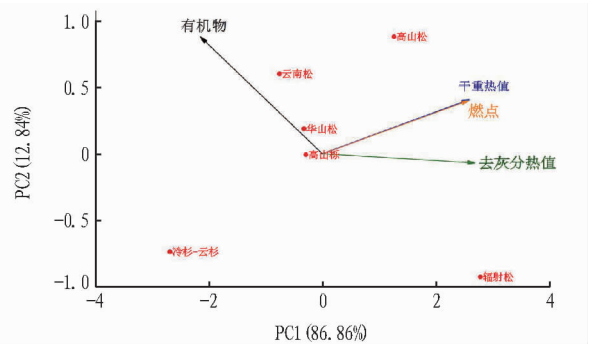


图 1 主成分分析结果

Fig.1 Principal component analysis results

表 4 主成分贡献率

Table 4 Contribution rate of principal components

成分 Component	信息含量 Information content	贡献率 Contribution rate // %	累计贡献率 Cumulative contribution rate // %
成分 1 Comp.1	3.474 25	86.86	86.86
成分 2 Comp.2	0.513 39	12.83	99.69
成分 3 Comp.3	0.012 33	0.31	100

表 5 主成分荷载矩阵的正交旋转

Table 5 Orthogonal rotation of principal component load matrix

指标 Index	成分 1 Comp.1	成分 2 Comp.2
GCV	0.514 96	0.385 55
AFCV	0.535 23	-0.065 42
燃点 Flash point	0.514 15	0.380 91
有机物含量 Organic content	-0.428 93	0.837 84

将表 4 中各主成分贡献率和表 6 中的各样本因子得分代入“1.4”中式(1),得出 6 个森林类型林下枯落物综合可燃性,其强弱表现为辐射松>高山松>高山栎>华山松>云南松>云杉-冷杉混交林。

表6 各森林类型综合指标排序

Table 6 Ranking of comprehensive indexes of forest types

树种 Tree species	成分1 Comp.1	成分2 Comp.2	燃烧性值 Flammability value	排序 Sort
高山栎 <i>Pinus armandii</i>	-0.289 12	-0.006 08	-0.251 909 696	3
高山松 <i>Pinus densata</i>	1.265 22	0.879 18	1.211 768 886	2
云杉-冷杉 <i>Picea asperata-Abies fabri</i>	-2.689 00	-0.736 48	-2.430 155 784	6
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	-0.753 73	0.599 96	-0.577 715 010	5
辐射松 <i>Pinus radiat</i>	2.789 89	-0.925 24	2.304 590 162	1
华山松 <i>Quercus semicarpifolia</i>	-0.323 26	0.188 66	-0.256 578 558	4

### 3 结论与讨论

凋落物是野外燃料的重要组成部分,是地面火灾的主要燃料。许多研究分析了植物不同器官的燃烧特性,如叶片、树枝等<sup>[20-21]</sup>,但很少有研究关注枯落物的燃烧性能。枯落物是森林系统中易被点燃的部分,同时也是影响地表火行为的主要燃料。该研究对川西地区主要森林类型枯落物的燃烧性能进行了测定和综合评价,对了解地表火的发生动态更具有针对性。针叶林中的可燃物燃烧性普遍偏高,发生森林火灾的风险较高,易造成严重的损失和危害。该研究综合评估了川西地区常见针叶林枯落物的可燃性差异,对6种森林类型林下枯落物的燃烧性强弱排序为辐射松>高山松>高山栎>华山松>云南松>云杉-冷杉混交林。该研究中的森林类型,在川西地区较常见,分布面积较广,结果有助于预测不同森林类型发生地表火的风险和强度,同时可为火灾预防提供参考。

针叶林下枯落物的燃烧性整体较高,被点燃后容易演变为树冠火,极易发生高强度森林火灾,是预防的重难点。及时清除地面上的枯枝和落叶堆,注意枝下高的修剪,改变可燃物的空间分布结构,减少垂直方向上的梯度可燃物,可有效降低火灾风险及火灾强度。另外,营造针阔混交林,也是降低林下可燃物燃烧性能的一种有效方法。

该研究通过测定与燃烧性紧密相关的稳定的理化指标,对不同森林类型枯落物的燃烧性能进行了综合评价。但森林可燃物燃烧性除决定于其理化性质外,还受气候、地形等多种因素的综合影响。在今后的研究中可加入地形、环境因素等信息,扩大样本数量,以更好地评估可燃物的燃烧性能,预测森林火灾的风险等级。

### 参考文献

- [1] BOWMAN D M J S, BALCH J K, ARTAXO P, et al. Fire in the Earth system[J]. *Science*, 2009, 324(5926): 481-484.
- [2] HE T H, LAMONT B B, PAUSAS J G. Fire as a key driver of Earth's biodiversity[J]. *Biological reviews of the Cambridge philosophical society*, 2019, 94(6): 1983-2010.
- [3] PAUSAS J G, KEELEY J E. Wildfires as an ecosystem service[J]. *Frontiers in ecology and the environment*, 2019, 17(5): 289-295.
- [4] BOWMAN D M J S, KOLDEN C A, ABATZOGLOU J T, et al. Vegetation fires in the Anthropocene[J]. *Nature reviews earth & environment*, 2020, 1(10): 500-515.
- [5] ELLIS T M, BOWMAN D M J S, JAIN P, et al. Global increase in wildfire risk due to climate-driven declines in fuel moisture[J]. *Global change biol-*

- ogy, 2022, 28(4): 1544-1559.
- [6] 赵凤君, 王明玉, 舒立福. 森林火灾中的树冠火研究[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(1): 39-43.
- [7] MENNING K M, STEPHENS S L. Fire climbing in the forest: A semi-quantitative, semi-quantitative approach to assessing ladder fuel hazards[J]. *Western journal of applied forestry*, 2007, 22(2): 88-93.
- [8] WANG S, NIU S K. Fuel classes in conifer forests of southwest Sichuan, China, and their implications for fire susceptibility[J]. *Forests*, 2016, 7(3): 1-13.
- [9] 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.
- [10] STEVENS R. Fuel loading, fuel moisture are important components of prescribed fire[J]. *Rangelands*, 2005, 27(5): 20-21.
- [11] 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.
- [12] 沈露, 伊力塔, 余树全, 等. 浙江省4种常绿阔叶树种枯落物的燃烧特性比较[J]. *林业资源管理*, 2012(3): 107-112.
- [13] 徐伟恒, 吴超, 杨磊, 等. 滇东北地区华山松与云南松的地表凋落物载量及火强度对比研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2019, 39(5): 151-156.
- [14] 张国防, 林文革, 花昆福, 等. 杉木人工林地地表易燃物含水率变化规律[J]. *福建林学院学报*, 2000, 20(1): 76-78.
- [15] FAURIA M M, MICHALETZ S T, JOHNSON E A. Predicting climate change effects on wildfires requires linking processes across scales[J]. *Wiley interdisciplinary: Climate change*, 2011, 2(1): 99-112.
- [16] MATTHEWS S. Dead fuel moisture research: 1991-2012[J]. *International journal of wildland fire*, 2014, 23(1): 78-92.
- [17] CORNELISSEN J H C, GROOTE MAAT S, VERHEIJEN L M, et al. Are litter decomposition and fire linked through plant species traits? [J]. *New phytologist*, 2017, 216(3): 653-669.
- [18] WANG C Y, DENG X W, XIANG W H, et al. Calorific value variations in each component and biomass-based energy accumulation of red-heart Chinese fir plantations at different ages[J]. *Biomass and bioenergy*, 2020, 134: 1-10.
- [19] 李丹丹, 张景忠, 张念慈. 林下草本植物燃烧性评价方法的探讨[J]. *林业勘查设计*, 2022, 51(2): 15-17, 21.
- [20] 张恒, 敖子琦, 乌日汉, 等. 内蒙古大兴安岭主要乔灌树种理化性质及抗火性研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2020, 40(4): 61-67.
- [21] 祝必琴, 黄淑娥, 田俊, 等. 亚热带季风区不同林型可燃物理化性质及燃烧性研究[J]. *江西农业大学学报*, 2011, 33(6): 1149-1154.
- [22] 王明霞, 单延龙, 尹赛男, 等. 11种树种的树皮抗火性[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 65-71.
- [23] 肖丽, 何玥, 沈皓, 等. 四川省森林火灾分析与防灾减灾决策系统的研究[J]. *电脑知识与技术*, 2022, 18(12): 1-3.
- [24] 李云松. 甘孜州林业资源现状调查[J]. *现代农业科技*, 2013(13): 181-182.
- [25] 贺家仁. 青藏高原东南缘——甘孜州的森林植物资源[J]. *资源节约和综合利用*, 1997(3): 52-54.
- [26] ZENG W S, TANG S Z, XIAO Q H. Calorific values and ash contents of different parts of Masson pine trees in southern China[J]. *Journal of forestry research*, 2014, 25(4): 779-786.
- [27] 赵璇, 游玮, 臧志, 等. 秦岭东段不同密度油松飞播林地地表可燃物载量及其影响因素研究[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(1): 159-165.