北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

滇中地区云南松林下蕨类可燃物潜在火行为

刘峻闻 朱熙隆 许师瑛 任航 杜鹏 闫想想 方向阳 王秋华

Potential fire behavior of fern fuel under *Pinus yunnanensis* forests in central region of Yunnan Province, southwestern China

Liu Junwen, Zhu Xilong, Xu Shiying, Ren Hang, Du Peng, Yan Xiangxiang, Fang Xiangyang, Wang Qiuhua

引用本文:
刘峻闻, 朱熙隆, 许师瑛, 任航, 杜鹏, 闫想想, 方向阳, 王秋华. 滇中地区云南松林下蕨类可燃物潜在火行为[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2):188–197. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250343
Liu Junwen, Zhu Xilong, Xu Shiying, Ren Hang, Du Peng, Yan Xiangxiang, Fang Xiangyang, Wang Qiuhua. Potential fire behavior of fern fuel under *Pinus yunnanensis* forests in central region of Yunnan Province, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2):188–197. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250343

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250343

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

计划烧除对云南松林地表可燃物火行为的影响
Effects of prescribed burning on fire behavior of surface fuel in *Pinus yunnanensis* forest land
北京林业大学学报, 2022, 44(5): 69–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200328

八达岭林场油松林冠层可燃物特征及潜在火行为
Characteristics and potential fire behavior of combustibles in the canopy of *Pinus tabuliformis* forest in Badaling Forest Farm of Beijing
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 55–64. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210084

四川西昌云南松林地表可燃物载量及影响因素研究
Surface fuel load and influencing factors of *Pinus yunnanensis* forest in Xichang City, Sichuan Province of southwestern China
北京林业大学学报, 2023, 45(10): 100–108. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220398

油松和侧柏林地表可燃物负荷量及影响因素
Land surface fuel load and influencing factors of *Pinus tabuliformis* and *Platycladus orientalis* plantations
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 33–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200364

抚育间伐对西山林场侧柏林冠层可燃物特征及潜在火行为的影响
Effects of thinning on canopy characteristics and potential crown fire behavior of *Platycladus orientalis* in Xishan Forest Farm of Beijing
北京林业大学学报, 2022, 44(8): 56–65. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210455

基于火模拟的森林火灾风险定量评估
Quantitative assessment for forest fire risk based on fire simulation: taking the Subtropical Forest Experimental Center of Chinese Academy of Forestry as an example
北京林业大学学报, 2022, 44(9): 83–90. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210328

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250343

滇中地区云南松林下蕨类可燃物潜在火行为

刘峻闻[1] 朱熙隆[1] 许师瑛[1] 任 航[1] 杜 鹏[1] 闫想想[1,2] 方向阳[2] 王秋华[1]
（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试验室，云南 昆明 650224；2. 昆明市林火防控和林草信息中心，云南 昆明 650500）

摘要:【目的】通过野外调查计划烧除前后云南松林下蕨类的动态变化，结合室内理化性质测定、燃烧床试验及锥形量热仪测试，探究其潜在火行为与理化性质、生长阶段燃烧特征的关联。**【方法】**在云南省新平彝族傣族自治县云南松林设置固定样地，外业调查计划烧除前 1 d、烧除后 5 d、烧除后 3 个月蕨类的数量、高度、盖度等野外特征；室内试验测定蕨类不同部位（茎、叶片、茎−叶混合）的灰分、粗脂肪、热值等理化性质，燃烧床试验模拟其垂直燃烧火行为，并利用锥形量热仪分析蕨类的质量损失速率和质量损失率。**【结果】**（1）野外调查显示，计划烧除使蕨类数量下降了 25%，但在草本中占比上升了 21.3%；烧除后 3 个月，蕨类数量激增了 89.36%，成为优势草本，盖度增加了 154.3%，高度持续下降了 10.5%；（2）蕨类不同部位的理化性质存在差异，灰分含量为 6.41% ~ 6.87%（叶片 > 茎−叶混合 > 茎），粗脂肪含量 0.5% ~ 2.5%（茎 > 茎−叶混合 > 叶片），热值 18 370 ~ 19 191 J/g（茎 > 茎−叶混合 > 叶片）。（3）燃烧床试验显示，云南松林下地表可燃物燃烧火焰高度达 28.4 cm，最高温度达 149.8 ℃；当蕨类参与燃烧时，火焰高度达 74.8 cm，提升约 163.4%，最高温度达 597.8 ℃，增幅约 299.1%，明显增加火焰的高度和温度。（4）锥形量热仪试验表明，蕨类燃烧特性受状态与部位影响。状态上，新鲜蕨类峰值质量损失速率及损失率均高于干枯蕨类；部位上，峰值质量损失速率排序为茎 > 茎−叶混合 > 叶片，质量损失率排序为叶片 > 茎−叶混合 > 茎；蕨类的质量损失率较燃烧床试验整体高约 27% ~ 63%。**【结论】**本研究揭示了云南松林下蕨类可燃物在不同生长阶段及不同部位的燃烧特性及其火行为、理化性质，锥形量热仪测得的燃烧特性参数之间有关联，为理解云南松林下蕨类对林火的影响提供了新的依据。

关键词：蕨类可燃物；地表可燃物；火行为；理化性质；锥形量热仪
中图分类号：S762.3 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)02−0188−10
引文格式：刘峻闻，朱熙隆，许师瑛，等. 滇中地区云南松林下蕨类可燃物潜在火行为 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(2)：188−197. Liu Junwen, Zhu Xilong, Xu Shiying, et al. Potential fire behavior of fern fuel under *Pinus yunnanensis* forests in central region of Yunnan Province, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2): 188−197.

Potential fire behavior of fern fuel under *Pinus yunnanensis* forests in central region of Yunnan Province, southwestern China

Liu Junwen[1] Zhu Xilong[1] Xu Shiying[1] Ren Hang[1] Du Peng[1] Yan Xiangxiang[1,2]
Fang Xiangyang[2] Wang Qiuhua[1]
(1. College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Yunnan Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control, Kunming 650224, Yunnan, China;
2. Kunming Forest Fire Prevention and Control and Forest and Grass Information Center, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: [**Objective**] Through field surveys before and after prescribed burning, this study investigated the dynamics of understory fern (*Pteridium* spp.) fuel in *Pinus yunnanensis* forests. Combined with laboratory analyses of physicochemical properties, combustion bed experiments and cone calorimetry tests,

收稿日期: 2025−09−06 **修回日期:** 2025−10−10
基金项目: 国家自然科学基金项目（32471878、32160376）。
第一作者: 刘峻闻。主要研究方向：森林防火。Email: 18008793377@163.com 地址：650224 云南省昆明市白龙寺 300 号西南林业大学土木工程学院。
责任作者: 王秋华，教授，博士生导师。主要研究方向：森林防火。Email：qhwang2010@swfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

it aims to explore the relationship between fern's potential fire behavior and its physicochemical properties, as well as its combustion characteristics across different growth stages. [**Method**] Fixed sample plots were established in *Pinus yunnanensis* forests in Xinping Yi and Dai Autonomous County, Yunnan Province of southwestern China. Field surveys were conducted one day before, five days and three months after prescribed burning to quantify the field characteristics of fern, including quantity, height and coverage. Laboratory analyses were conducted to determine physicochemical properties, such as ash content, crude fat content, and calorific value for different parts of fern (stem, leaf and stem-leaf mixture). Combustion bed experiments were used to simulate vertical fire spread, and cone calorimetry was employed to analyze the mass loss rate and mass loss percentage of fern. [**Result**] (1) Field surveys showed that prescribed burning initially reduced the quantity of fern by 25%, yet increased its relative proportion within the herb layer by 21.3%. Three months after burning, the quantity surged by 89.36%, making it the dominant herbaceous species; its coverage rebounded by 154.3%, while its height continued to decrease by 10.5%. (2) Physicochemical properties varied among different parts of fern. Ash content ranged from 6.41% to 6.87% (leaf > stem-leaf mixture > stem), crude fat content varied between 0.5% and 2.5% (stem > stem-leaf mixture > leaf), and calorific values were 18 370 − 19 191 J/g (stem > stem-leaf mixture > leaf). (3) Combustion bed tests demonstrated that the combustion of surface fuels in *Pinus yunnanensis* forests produced a flame height of 28.4 cm and a peak temperature of 149.8 ℃. When fern was involved in combustion, the flame height increased by about 163.4% to 74.8 cm, and the peak temperature increased by about 299.1% to 597.8 ℃, showing significant enhancement in both flame height and temperature. (4) Cone calorimetry tests revealed that the combustion characteristics of fern were influenced by its moisture state and plant parts. In terms of state, fresh samples exhibited higher peak mass loss rates and greater total mass loss percentages than withered samples. Regarding plant parts, the peak mass loss rate ranked in the order of stem > stem-leaf mixture > leaf, while the total mass loss percentage followed leaf > stem-leaf mixture > stem. The mass loss percentages of fern were overall about 27% to 63% higher than those obtained from combustion bed tests. [**Conclusion**] This study reveals clear links between combustion characteristics of understory fern fuel in *Pinus yunnanensis* forests across different growth stages and plant parts, and its fire behavior, physicochemical properties and combustion parameters measured by cone calorimetry. These findings provide new scientific basis for understanding the influence of understory fern on forest fires in this ecosystem.

Key words: fern fuel; surface fuel; fire behavior; physicochemical properties; cone calorimeter

在气候变化等多重因素的共同作用下，森林火灾频发态势加剧，单次火灾造成的损失持续扩大[1−3]。这与植被状况及火势特点（火蔓延速度及火强度）密切相关，不仅导致火灾破坏范围扩大、破坏程度加剧，还会大幅提升碳释放量，进一步加剧全球变暖趋势，形成恶性循环[4]。森林可燃物是森林火灾的物质基础，也是发生森林火灾的首要条件。了解森林可燃物的性质与潜在火行为是森林可燃物管理的重要环节，也是有效解决林火安全问题的必经之路[5−6]。Kucuk 等[7]通过构建土耳其典型可燃物类型的可燃物模型，量化了不同可燃物组成对火行为的关键影响。研究表明，采伐剩余物的火行为强度随分解时间延长而显著减弱；Samara 等[8]基于 NEXUS 火行为模型的模拟分析表明，对希腊城郊森林实施疏伐与下层清理等抚育措施可有效降低可燃物负荷与连续性，降低地表火向冠层火转化的风险；张玉春等[9]通过 BehavePlus 模拟表明，川西南地区林下存在灌木或草本层的林分易引发高强度地表火与树冠火，且火行为随风速和坡度增加而加剧；满钰玲等[10]研究了 15% 轻度间伐后不同时间油松（*Pinus tabuliformis*）林可燃物特征及潜在火行为，发现间伐后，油松林在特定条件下可能发生高强度连续型树冠火。锥形量热仪可对植物材料的各项燃烧特性指标进行系统、精准的量化分析，为可燃物的潜在火行为提供试验依据，例如季远帆等[11]通过锥形量热仪试验表明，南方阔叶植物叶片耐火性优于针叶植物，其中干鲜状态对阔叶燃烧特性影响更显著，而热通量与质量对针叶影响更大；Fateh 等[12]通过锥形量热仪试验表明，海岸松（*Pinus pinaster*）针叶燃烧主要释放二氧化碳和水，且一氧化碳与碳氢化合物约占碳释放总量的 5%。

蕨类(*Pteridium* spp.)为蕨属植物，叶片大，地下根茎粗壮且具强韧表皮，喜阴湿，通过孢子繁殖，生命力极强，是云南松(*Pinus yunnanensis*)林下地表可燃物的重要组成部分[13−15]。蕨在枯死期燃烧性较强，枯死后，主体仍能保持直立，且干枯的叶子高度较高，易与周边灌木或枯枝交织，形成“梯状可燃物”，便于火的垂直传播；若枯蕨倒下，其宽大的叶片会水平铺开并与周边草本植物交织，加快林火在水平方向上的蔓延。密集分布的蕨在云南松林形成可燃物垂直分层，是连接灌木层和草本层可燃物的通道，促进林内“梯状可燃物”形成，使地表火更容易发展成树冠火[16−21]。蕨的燃烧性能极大地影响着云南松林火灾的发展，因此深入开展对蕨类可燃物的研究，并实施科学有效的管理措施，对预防与处置森林火灾显得尤为重要。国内外围绕蕨类的研究已形成多维度探索。在蕨类的群落生态研究方面，Senyanzobe 等[22]研究发现，蕨类在卢旺达纽格威森林 4 个植物群落中占据主导地位，显著影响植被结构与多样性；Gaudio 等[23]发现，蕨类在低至 6% 全光照条件下，仍保持高达 75% 的覆盖度，并通过降低叶片质量来适应弱光环境，展现出极强光竞争优势；Gray 等[24]研究证实，蕨类在夏雨区蒸散量呈强季节变化，且秋季蒸散受夏季降雨模式调控。在蕨类生理与成分分析方面，徐惠敏等[25]用 FTIR 结合 PLS 建模，快速测定蕨类总多糖含量；在遥感监测方面，Holland 等[26]研究发现，结合多时相 Landsat 影像与亚像元轮廓超分辨率技术可显著提升蕨类的分布监测精度。

目前研究虽覆盖蕨类的关键研究领域，但在林火相关研究层面仍存在不足。表现为蕨类的生理化学研究与燃烧性结合不足，缺乏其作为地表可燃物的核心燃烧属性(热值、粗脂肪含量、灰分含量)；群落生态研究则局限于蕨类的分布识别，缺少其分布对梯状可燃物结构及林火蔓延风险的影响分析；且蕨类作为林火场景下的潜在可燃物，其燃烧时的火行为特征研究还较为有限。本研究通过多试验手段相互结合、相互验证，探究蕨类的潜在火行为，整合野外调查、理化性质测定(灰分、粗脂肪、热值)、室内燃烧床模拟(火焰高度、温度等火行为参数)及锥形量热仪测试，发现蕨类在不同生长阶段(新鲜、干枯)、不同部位(茎、叶、茎−叶混合)的燃烧特性与理化性质、潜在火行为的内在关联，聚焦蕨类植物的潜在火行为对森林火险的驱动机制，为解析其对云南松林火动态的影响提供新依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

新平彝族傣族自治县(以下简称为“新平县”)位于云南省玉溪市西南部(23°38′15″ ~ 24°26′05″N，101°16′30″ ~ 102°16′50″E)(图 1)，地处哀牢山中段东麓，以山地为主，山区面积占 98.03%[27]。属温带气候区，但因海拔差异形成河谷高温区、半山暖温区和高山寒温区 3 种局部气候类型，年均气温 18.1 ℃，极端最高气温 32.8 ℃，年降水量 869 mm，年日照时数 2 838.7 h[28]，植被的乔木层以云南松为主，并伴生有云南油杉(*Keteleeria evelyniana*)和栓皮栎(*Quercus variabilis*)等树种，灌木层主要包括光叶石栎(*Lithocarpus mairei*)、杨梅(*Morella rubra*)和珍珠花(*Lyonia ovalifolia*)等，草本层则包括蕨类、四脉金茅(*Eulalia quadrinervis*)和野拔子(*Elsholtzia rugulosa*)等[29−30]。样地内的云南松林是 1993 年左右飞播造林形成的，从 2007 年起开展计划烧除，仅 2020、2021、2024 年暂停，是计划烧除的典型实施区域，每年计划烧除面积约 80 000 hm^2[31]。林分郁闭度约 0.85，平均树高 15 m，平均胸径 16.1 cm[32]。云南省防火期(每年的 12 月 1 日至次年 6 月 15 日)初期，林下蕨类多为枯死状态，防火中后期，蕨类逐渐萌发生长，

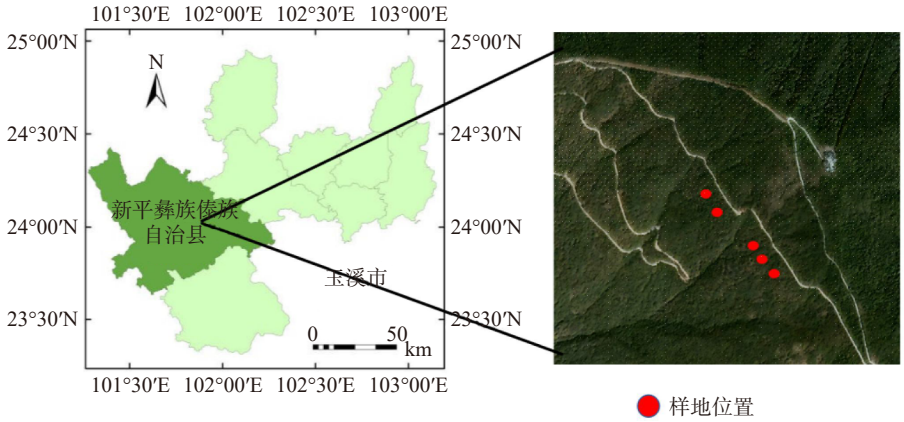


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of research area

转以鲜活状态为主。

1.2　研究方法

1.2.1　外业调查

2025 年 2 月 5 日（计划烧除前 1 d），研究团队在新平县照壁山连续计划烧除区设置了 5 个 5 m × 5 m 的固定样地（图 1），以调查计划烧除前研究区蕨类植物的分布状况。2 月 6 日实施了计划烧除作业，于 2 月 11 日（计划烧除后 5 d）对各样地进行了火后初步调查，并于 2025 年 5 月 6 日（计划烧除后 3 个月）再次调查了样地内蕨类植物的恢复情况。

本研究的样地设置于云南松林连续计划烧除区域内，选取林下有代表性且生境条件基本一致的地方；所有样地均布设于坡中、上部，且确保样地间海拔相近，坡向基本一致。样地设置时，确定好每个样方的 4 个顶点位置，再使用皮尺连接顶点围出边界（图 2a），沿样方对角线设置 3 个 1 m × 1 m 的小样方（图 2b）。记录样地内蕨类的株数、盖度及平均高度。同时，采集各小样方内的全部凋落物，收割样方中所有蕨类的地上部分，并将整株带回试验室备用。

1.2.2　理化性质测定

可燃物的燃烧性受灰分、热值、粗脂肪影响显著：灰分能滞缓火焰蔓延，含量越高，火焰蔓延越慢，可燃物燃烧性越差；可燃物热值是绝干状态下，单位质量完全燃烧释放的热量，释放热量越多，其抗火性能越差；粗脂肪是成分复杂的易燃物质，其含量直接影响可燃物的燃烧性[33]。

本试验将蕨类分为茎、叶、茎–叶混合 3 个组，分别测定蕨类不同部位的灰分、粗脂肪含量及热值，以分析蕨类的燃烧性；每个部位设计 3 次重复试验，取平均值。

（1）灰分含量测定采用干灰分法[34]，用公式（1）计算。

$$A=\frac{m_0}{m_1}\times 100\% \tag{1}$$

式中：A为灰分含量；m_0为燃烧后剩余物质量，g；m_1为样品初始质量，g。

（2）热值测定采用量热法[35]，用公式（2）计算。

$$Q=K\frac{(T-T_0)+\Delta t}{G} \tag{2}$$

式中：Q为可燃物发热量，J/g；K为水当量，kJ/℃；T_0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，kg。

（3）粗脂肪测定采用索氏提取法[36]，用公式（3）计算。

$$B=\frac{m_3}{m_2}\times 100\% \tag{3}$$

式中：B为粗脂肪质量分数；m_2为样品绝干质量，g；m_3为样品中油脂质量，g。

1.2.3　潜在燃烧火行为试验

试验前，首先选取 3 份凋落物进行烘干处理，计算其含水率。由于蕨类的燃烧受叶片高度、过火速度、地表火焰高度等因素影响，本试验设置了 10 个蕨类组重复试验和 3 个对照组（不含蕨类）进行燃烧试验。在室内设置铁质燃烧床，内长 200 cm，内宽 120 cm，内高 32 cm，底部覆盖一层石膏板防止热量流失，参考样地平均坡度，将室内燃烧试验坡度设为 15°，模拟无风状态下的燃烧。称取样方内采集的地表可燃物，均匀铺在 1 m × 1 m 的燃烧区中，用铁丝网格将蕨类固定在燃烧区上方，根部贴紧燃烧床，模拟野外蕨类的直立状态。将 8 根热电偶（编号为 1 ~ 8 号）从高到低均匀放置在燃烧区域上方 40 cm 处，对照组按同样的方式设置热电偶。模拟计划烧除的用火方式，用点火器点燃下坡火，钢卷尺测量火焰高度，手持红外测温仪 SL-309 测量燃烧时的地表温度（地表可燃物被点燃后，每 30 s 记录 1 次最高



a 实地调查　　b 样方设置

图 2　样方布设方案及实地照片

Fig. 2　Sample plot layout and field photographs

值)，秒表记录燃烧时间和熄灭时间。

1.2.4 锥形量热仪测试

在模拟野外真实生长状况的基础上，将蕨类样本按干枯和新鲜分为 2 大组，每组均包含茎、叶片及茎−叶混合(茎−叶质量比为 1∶1)3 部分。由于不同样品的质量、体积和孔隙度存在差异，为了防止产生高度差，在样品盒底部垫上隔热海绵，将蕨类茎、叶片、茎−叶混合的样品高度控制在 15、30、25 mm；用天平将 3 者的质量分别控制在(9.5 ± 0.2)g、(4.4 ± 0.2)g 和(6.2 ± 0.2)g 范围内，随后将各部分样品裁剪至合适长度，并均匀铺设在样品盒中。接着选取 35 kW/m^2 的辐射强度以模拟森林火灾初发时可燃物周围的热辐射强度。将装好样品的盒子放置在电子天平上，记录质量数值。之后打开锥形炉挡板，每次试验均使用点火器点燃样品以启动燃烧试验；当燃烧反应结束且样品质量保持相对稳定时，结束本次试验(将持续时间设定为 200 s)，每组试验重复进行 5 次。

2 结果与分析

2.1 蕨类可燃物对计划烧除的动态响应

计划烧除对林下蕨类及草本植物群落具有明显影响。烧除前(图 3a)，蕨类以直立枯死的状态存在，与草本植物混合生长且有一定覆盖度；烧除后 5 d(图 3b)，草本植物数量明显减少，但仍有部分蕨类植株残留；至烧除后 3 个月(图 3c)，蕨类已萌发出新叶，在草本中逐渐占据相对优势地位，其覆盖度增加。

分析烧除前后蕨类野外状态的动态变化(表 1)发现，计划烧除后，草本数量减少了 45.45%，尽管蕨类的数量下降了 25%，但其在草本中占比上升了 21.3%。计划烧除使得草本数量减少，但火对蕨类的影响较小，使得计划烧除后蕨类的占比有较大提升。计划烧除后 3 个月，蕨类开始大量生长，数量上升了 89.36%，而其他草本生长速度较慢，蕨类成为样地的主要组成部分。

在高度方面，计划烧除后 5 d，蕨类高度较烧除前下降了 25.34%，计划烧除后 3 个月，蕨类平均高度在此基础上又下降了 10.5%，原因在于本阶段新生蕨类大多还处于生长阶段，个体高度相对较低，因而蕨类的平均高度下降。盖度方面，计划烧除后 5d 的蕨类盖度较计划烧除前减少了约 54.9%，计划烧除后 3 个月，蕨类盖度较计划烧除后 5d 的盖度增加了约 154.3%，这可能因为在计划烧除后 5 d，蕨类数量减少，剩余蕨类的叶片也在计划烧除过程中受损，使得蕨类的盖度明显下降；3 个月之后，蕨类开始萌发，叶片不断伸展，盖度随之增加。由此可见，计划烧除只能够在短时间内减少蕨类的数量，一段时间之后，蕨类开始恢复生长，新生长的蕨类仍然是潜在的火灾风险，所以对计划烧除区蕨类的状况应该实施连续动态监测，不可大意。

2.2 蕨类不同部位理化性质差异

可燃物燃烧性和灰分含量呈负相关，和粗脂肪含量呈正相关[37]；可燃物热值越高，在燃烧过程中越能释放出更多的热量。从蕨类不同部位的理化性质(表 2)来看，茎−叶混合、茎、叶片的灰分差距不大，灰分在 6.41% ~ 6.87%，为中等水平；蕨类的粗脂肪含量在 0.50% ~ 2.50%，在中低等水平，茎的粗脂肪含量为中等水平，叶的粗脂肪含量为低水平；蕨类的热值在 18 370 ~ 19 191 J/g < 20 000 J/g，属于中等可燃物。蕨类具有粗脂肪含量偏低、灰分和热值中等的燃烧特征[38]；蕨类各部位可燃性排序为：茎 > 茎−叶混合 > 叶片。蕨类总体燃烧性处于中等水平，需



a 计划烧除前 1 d　　b 计划烧除后 5 d　　c 计划烧除后 3 个月

图中植被分层高度范围为：草本0 ~ 0.3 m，蕨类0 ~ 0.8 m，云南松0 ~ 12 m。

图 3 云南松林下计划烧除前后蕨类动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of fern before and after prescribed burning in *Pinus yunnanensis* forest

表 1 烧除前、后蕨类野外状态动态变化

Tab. 1 Dynamic changes in field state of fern before and after prescribed burning

时间	草本数量/丛	蕨类数量/株	蕨类占比/%	蕨类高度/cm	蕨类盖度/%
烧除前1 d	61.6 ± 8.2	37.6 ± 8.6	60.6 ± 6.2	66.3 ± 9.1	28.6 ± 2.4
烧除后5 d	33.6 ± 9.7	28.2 ± 10.8	81.9 ± 10.8	49.5 ± 12.9	12.9 ± 2.1
烧除后3个月	58.8 ± 20.3	53.4 ± 22.1	88.5 ± 8.9	44.3 ± 12.2	32.8 ± 8.0

表 2　蕨类不同部位理化性质

Tab. 2　Physicochemical properties of different parts of fern

部位	平均灰分含量/%	平均热值/(J·g^{-1})	平均粗脂肪含量/%
茎–叶混合	6.86	18 818.06	0.67
茎	6.41	19 191.47	2.50
叶片	6.87	18 370.21	0.50

依赖持续火源维持燃烧。

2.3　蕨类可燃物燃烧潜在火行为特征

2.3.1　燃烧床燃烧试验火行为

随机取 3 份从小样方采集的凋落物样品，测得其含水率为(13.03 ± 2.26)%，对照组和蕨类组的地表可燃物载量(0.536 ± 0.029)kg、地表火持续时间(6.36 ± 1.01) min、地表温度(540.32 ± 40.25)℃，差距不大，可视为相同燃烧环境。在点燃下坡火后，橙黄色火焰沿着地表可燃物缓慢向下蔓延(图 4a)，由于蕨类的茎秆贴近地表，会率先与地表火焰接触并被引燃，茎燃烧的火焰强度较低且持续时间较短；随着燃烧过程推进，当地表火焰引燃蕨类的叶片后，火焰高度迅速升高，同时向周围相邻叶片快速蔓延，形成叶片层燃烧现象(图 4b)；在失去下方地表火焰的持续热量支持后，叶片层火焰会逐渐减弱并最终熄灭。

对蕨类的燃烧火行为数据(表 3)分析发现，对照组中，地表最高火焰高度为 28.4 cm，蕨类参与燃烧时，最高火焰高度可达 74.8 cm，提高了约 163.4%，火焰高度显著升高。此次计划烧除情形下，过火后蕨类的质量损失率约为 49.5%，说明计划烧除显著减少了蕨类的生物量，但仍有部分蕨类的残留。当蕨类参与燃烧时，最高温度为 597.8 ℃，而无蕨类参与燃烧时，最高温度仅为 149.8 ℃，前者较后者温度约提升了 299.1%，这表明蕨类参与燃烧可使测量点的温度显著提升。由于蕨类叶片高度较高，其燃烧程度易受火焰高度和燃烧速度的影响，火焰过低或燃烧速度过快都会削弱燃烧效果。在燃烧床试验中，相较于稳定热源，火焰更不稳定，所以在燃烧过程中，蕨类的质量损失率波动范围较大，介于 28%~71% 之间。

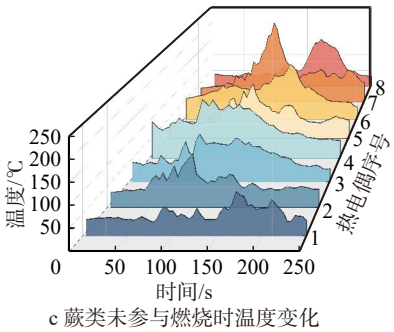
蕨类没有参与燃烧时(图 4c)，测量点处的温度在 50 ~ 230 ℃ 之间，随着地表火的靠近，温度整体呈现先上升后下降的趋势。蕨类参与燃烧时(图 4d)，1 ~ 8 号热电偶信号均为单峰值，测量点处的温度在



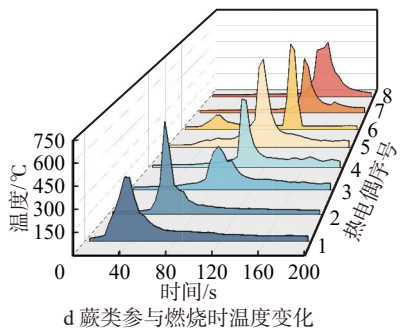
a 对照组火行为



b 蕨类组火行为



c 蕨类未参与燃烧时温度变化



d 蕨类参与燃烧时温度变化

图 4　相比于对照组的蕨类燃烧火行为与温度变化特征

Fig. 4　Fire behavior and temperature changing characteristics of fern combustion compared with control group

表 3　蕨类燃烧火行为参数

Tab. 3　Fire behavior parameters of fern combustion

项目	火焰持续时间/min	地表最高温度/℃	火焰高度/cm	质量损失率/%	测量点处最高温度/℃
蕨类组	6.3 ± 1.0	540.3 ± 40.3	74.8 ± 5.6	49.5 ± 21.5	597.8 ± 123.2
对照组	6.0 ± 1.4	571.8 ± 28.9	28.4 ± 5.7	0.0 ± 0.0	149.8 ± 41.2

经历 50 ~ 100 ℃ 的平稳阶段后，于 10 ~ 30 s 内迅速上升至 400 ~ 720 ℃ 的高温峰值，随后快速下降并保持平稳状态，整体呈现出先升后降的趋势。

2.3.2 基于锥形量热仪的燃烧特性

质量损失速率（mass loss rate，MLR）表示样品在燃烧试验中质量的减少速度，反映了样品在设定热辐射流量条件下的热分解反应速率[39−42]。分析干枯蕨类和新鲜蕨类不同部位的峰值质量损失速率（图 5）发现，新鲜蕨类茎的峰值质量损失速率为 43.11 g/(s·m^2)，干枯蕨类茎的峰值质量损失速率为 24.76 g/(s·m^2)，前者比后者高约 74.11%，新鲜蕨类叶片的峰值质量损失速率为 20.42 g/(s·m^2)，干枯蕨类叶片的峰值质量损失速率为 13.95 g/(s·m^2)，前者比后者高约 46.45%；新鲜蕨类茎−叶混合的峰值质量损失速率为 19.86 g/(s·m^2)，干枯蕨类茎−叶混合的峰值质量损失速率为 18.79 g/(s·m^2)，前者比后者高约 5.70%。更高的峰值质量损失速率说明蕨类燃烧时，能在单位时间内损失更多质量，燃烧过程更加剧烈。从蕨类的状态分析，新鲜蕨类的含水率较高，不易引燃，但在实验室条件下，一旦被其他引燃物引燃，其失水速率会很快，即峰值质量损失速率排序为新鲜蕨类 > 干枯蕨类，因而新鲜蕨类的燃烧过程比干枯蕨类更加剧烈；从蕨类不同部位分析，新鲜蕨类叶片组峰值质量损失速率与茎−叶混合组基本相等，原因在于茎叶混合后，孔隙更加均匀，且二者在燃烧过程中能相互补充，使新鲜蕨类燃烧过程更加稳定；干枯蕨类叶片的峰值质量损失速率比茎−叶混合组低约 25.76%，原因在于干枯蕨类茎与叶片的峰值质量损失速率差距小于新鲜蕨类组，这导致混合后，茎与叶的“补充”效果不如新鲜蕨类组显著。总体来看，峰值质量损失速率排序为茎 > 茎−叶混合 > 叶。

蕨类不同部位及不同状态下的样品质量损失率（表 4）存在一定差异。从蕨类的状态方面分析，新鲜蕨类的质量损失率在 96% ~ 98%，干枯蕨类的质量损失率在 91% ~ 98%，质量损失率排序为新鲜蕨类 > 干枯蕨类。从蕨类不同部位分析，叶片的质量损失率要大于茎，茎−叶混合的质量损失率处于二者之间，质量损失率排序为叶片 > 茎−叶混合 > 茎。对比表 3 和表 4 的数据可以发现，锥形量热仪比燃烧床试验的质量损失率整体提升了 27% ~ 63%。

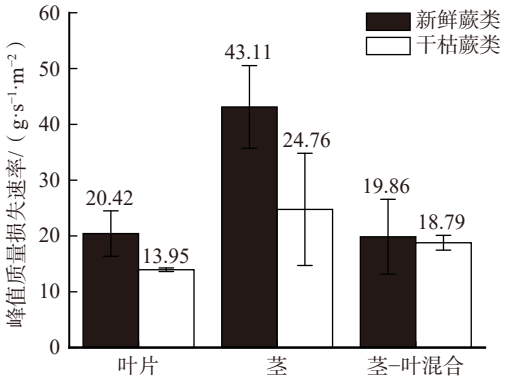


图 5 干枯蕨类和新鲜蕨类不同部位峰值质量损失速率

Fig. 5 Peak mass loss rates of various parts for withered and fresh fern

3 讨 论

本研究中，理化性质包括热值、灰分和粗脂肪含量等，试验结果与李佳琳等[43]在云南松林下蕨类的理化性质测得结果相符。总体来看，蕨类属于中等可燃物，需要外部火源引燃。室内燃烧床试验结果与王劲等[44]在蕨类−云南松林计划烧除中观察到的火焰高度（80.20 ± 7.50）cm 和最高温度（513 ± 65）℃较为接近，而相较于 Hong 等[45]针对云南松林计划烧除的火焰高度（43.40 ± 5.94）cm，本试验的火焰高度则更高，进一步印证了蕨类自身的燃烧特性比较稳定，能在一定程度上促进火焰发展，导致现场火焰高度明显提升。结合张运生等[46]在云南松林内的实地调查数据（灌木层平均高度 152 cm）进行综合分析可知，本试验中，蕨类可燃物燃烧所形成的火焰高度已具备对林下灌木层构成直接威胁的条件，存在从地表火向灌木层火蔓延的潜在风险。在锥形量热仪试验中，茎、叶及茎−叶混合样品的燃烧质量损失率均较高（大于 90%），与 Ji 等[47]测定的南方常见阔叶树叶片数据相比，本试验的质量损失率均处于较高水平，燃烧较为充分；燃烧床试验中，蕨类的质量损失率（28% ~ 71%）要远低于锥形量热仪的测定值，因为锥形量热仪是小尺度下持续加热的理想燃烧环境，燃烧床是在 1 m × 1 m 的尺度下进行试验性燃烧，其火焰存在不稳定性。所以在实际燃烧过程中，蕨类

表 4 蕨类燃烧的质量损失率

Tab. 4 Mass loss rates of fern during burning

项目	新鲜蕨类			干枯蕨类		
	茎	叶片	茎−叶混合	茎	叶片	茎−叶混合
初始质量/g	9.43 ± 0.23	4.47 ± 0.12	6.13 ± 0.12	9.53 ± 0.15	4.43 ± 0.06	6.20 ± 0.10
剩余质量/g	0.37 ± 0.46	0.2 ± 0.00	0.10 ± 0.00	0.80 ± 0.26	0.10 ± 0.00	0.30 ± 0.10
损失率/%	96.08	97.76	96.74	91.61	97.74	95.16

仍具有较强的燃烧潜力，当燃烧条件充足时，可释放更多热量。

本次采样均在防火期内完成，2 月份的蕨类处于完全枯死且直立的状态，4 月份则处于拳卷期和展叶状态。计划烧除后，蕨类迅速再生且分布密集，应重视其火行为动态。为进一步评估蕨类在不同环境中的潜在火行为及其对森林防火的影响，未来可在雨季（6—9 月）补充采样，开展对比研究，更准确地了解新鲜蕨类和枯死蕨类的更多理化性质特征。此外，可增加采集其他地表可燃物（如松针、细枝等），按不同比例与蕨类混合，系统研究云南松林地表可燃物综合燃烧性与火行为。

在样地设置方面，需适当增加样地整体数量，且在只开展过 1 次计划烧除的区域增设样地，通过对比该区域与原有连续计划烧除区域的蕨类生长情况，明确连续计划烧除对蕨类的影响。试验设计方面，可在燃烧床试验中补充草本、灌木、乔木的设置，进一步探究云南松林梯状可燃物的燃烧火行为，并设置地表可燃物载量梯度以探究载量对蕨类燃烧的影响；同时，加强对未烧除区域蕨类生长状态的持续观测，通过长期跟踪监测，明确不同火干扰模式下蕨类的生长动态差异。在研究方法上，充分挖掘锥形量热仪所测参数与燃烧床火行为参数的关联性，通过热解动力学分析蕨类的最大失重速率、温度及残炭率等参数的相关性，建立热解动力学方程，更精准地把握蕨类可燃物的燃烧性。

4　结　　论

在云南松林下蕨类可燃物理化性质中，灰分含量、热值以及粗脂肪含量的范围分别为 6.41% ~ 6.87%、18 370 ~ 19 191 J/g、0.5% ~ 2.5%；灰分含量排序为叶片 > 茎–叶混合 > 茎；粗脂肪含量排序为茎 > 茎–叶混合 > 叶片；热值排序为茎 > 茎–叶混合 > 叶片。总体看，云南松林下蕨类的各部位燃烧性排序为茎 > 茎–叶混合 > 叶片。

室内模拟火行为试验表明，蕨类燃烧的火焰高度依赖于地表火，其自身难以维持稳定燃烧。无蕨类参与燃烧时，地表可燃物燃烧的火焰最高高度为 28.4 cm，最高温度为 149.8 ℃；蕨类参与燃烧后，地表火焰高度提升了 163.4%，最高达 74.8 cm；最高温度升至 597.8 ℃，增幅 299.1%。锥形量热仪测试中，蕨类燃烧特性受其状态、部位影响。状态上，新鲜蕨类的峰值质量损失速率（19.86 ~ 43.11 g/(s·m^2)）整体高于干枯蕨类的（13.95 ~ 24.76 g/(s·m^2)），其质量损失率（96% ~ 98%）也略高于干枯蕨类的（91% ~ 98%），说明新鲜蕨类热分解更快、燃烧更剧烈且彻底；部位上，峰值质量损失速率排序为茎 > 茎–叶混合 > 叶片，质量损失率排序为叶片 > 茎–叶混合 > 茎，说明茎的燃烧更剧烈，叶片的燃烧更充分。锥形量热仪测得的质量损失率比燃烧床试验高约 27% ~ 63%，说明蕨类在实际场景中还存有更好的燃烧潜力。

云南松林下的蕨类属于中等燃烧性可燃物，是防火期内主要林下可燃物。其燃烧特性受生长阶段和部位影响，无论在干枯还是新鲜状态下，均具备引火能力。计划烧除虽能在短期内有效降低蕨类可燃物载量以减少森林火灾风险，但烧除后，重新萌发的蕨类仍是潜在火险，需加强火后监测与可燃物清理，防止“梯状可燃物”形成，降低地表火向树冠火转变的风险。本研究结果从可燃物角度，为滇中地区云南松林的火管理提供了理论依据，为森林火险等级评估提供了参数支持。

参　考　文　献

[1] 岳超, 罗彩访, 舒立福, 等. 全球变化背景下野火研究进展 [J]. 生态学报, 2020, 40(2): 385−401.
Yue C, Luo C F, Shu L F, et al. A review on wildfire studies in the context of global change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 385−401.

[2] 王会军, 陈活泼. 科技支撑西部气候变化应对 [J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(6): 1000−1008.
Wang H J, Chen H P. Technology support for climate change response in western China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(6): 1000−1008.

[3] 李维伟, 杨雪清, 张一鸣, 等. 基于小班尺度的北京市密云区森林火灾危险性评价 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2): 75−86.
Li W W, Yang X Q, Zhang Y M, et al. Hazard assessment of forest fire in Miyun District of Beijing based on the subcompartment scale [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 75−86.

[4] 刘蕊. 气候“鞭打”事件正在加剧 [N]. 中国气象报, 2025−08−01(3).
Liu R. Climate “Whipping” events are intensifying[N]. China Meteorological News, 2025−08−01 (3).

[5] 李保中, 杨光, 宁吉彬, 等. 森林可燃物调控技术及其评价方法 [J]. 林业科学, 2024, 60(10): 143−153.
Li B Z, Yang G, Ning J B, et al. Forest fuel management technologies and their evaluation methods [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(10): 143−153.

[6] 陈敏斯, 杜建华, 王薇, 等. 八达岭林场油松林冠层可燃物特征及潜在火行为 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 55−64.
Chen M S, Du J H, Wang W, et al. Characteristics and potential fire behavior of combustibles in the canopy of *Pinus tabuliformis* forest in Badaling Forest Farm of Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 55−64.

[7] Kucuk O, Bilgili E, Fernandes P M. Fuel modelling and potential fire behavior in Turkey[J]. Sumarski List, 2015, 139(11−12): 553−560.

[8] Samara T, Raptis D, Spanos I. Fuel treatments and potential fire

behavior in peri-urban forests in northern Greece [J]. Environments, 2018, 5(7): 79.

[9] 张玉春, 向冬, 郭瀚文, 等. 川西南森林可燃物分布调研及潜在火行为研究 [J]. 自然灾害学报, 2023, 32(2): 108−116.
Zhang Y C, Xiang D, Guo H W, et al. Research on the distribution of combustible materials and potential fire behavior in southwest Sichuan forests [J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(2): 108−116.

[10] 满钰玲, 任云卯, 冯昕, 等. 抚育间伐对北京西山林场油松林可燃物特征及潜在火行为的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2025, 53(5): 88−99.
Man Y L, Ren Y M, Feng X, et al. Effects of thinning on fuel characteristics and potential fire behavior of *Pinus tabuliformis* in Xishan Forest Farm of Beijing [J]. Journal of Northwest A& F University (Natural Science Edition), 2025, 53(5): 88−99.

[11] 季远帆, 黄锐, 陈一戈, 等. 应用锥形量热仪法测定植物的叶片燃烧特性 [J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(7): 108−117, 123.
Ji Y F, Huang R, Chen Y G, et al. Determination of the combustion characteristics of plant leaves by using the cone calorimeter method [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(7): 108−117, 123.

[12] Fateh T, Richard F, Batiot B, et al. Characterization of the burning behavior and gaseous emissions of pine needles in a cone calorimeter-FTIR apparatus [J]. Fire Safety Journal, 2016, 82: 91−100.

[13] 梁梦芳, 刘何铭, 江山, 等. 林下密集蕨类层生态学研究进展 [J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(2): 291−300.
Liang M F, Liu H M, Jiang S, et al. Research progress on the ecology of dense fern understory [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2022, 30(2): 291−300.

[14] 孙晓梅, 李恒, 孙戍男, 等. 北方地区 3 种蕨类孢子组培萌发率研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(3): 265−270.
Sun X M, Li H, Sun X N, et al. Study on germination technology of three species of fern spores in northern area [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(3): 265−270.

[15] 张文文, 闫想想, 王秋华, 等. 计划烧除对云南松林地表可燃物火行为的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(5): 69−76.
Zhang W W, Yan X X, Wang Q H, et al. Effects of prescribed burning on fire behavior of surface fuel in *Pinus yunnanensis* forest land [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(5): 69−76.

[16] 张桥蓉, 仝艳民, 徐榕辰, 等. 昆明地区何首乌枯藤引燃藏柏带叶小枝的影响因素 [J]. 西北林学院学报, 2025, 40(3): 135−140, 152.
Zhang Q R, Tong Y M, Xu R C, et al. Withered climbing plant of *Fallopia multiflora* igniting the twig with leaf of *Cupressus torulosa* in Kunming area [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2025, 40(3): 135−140, 152.

[17] 洪瑞成, 朱熙隆, 许师瑛, 等. 西南林区主要针叶树种对火的适应和响应研究进展 [J]. 生态学杂志, 2025, 44(12): 4152−4158.
Hong R C, Zhu X L, Xu S Y, et al. Advancements in research on fire adaptations and responses of major coniferous tree species in southwestern China forests [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(12): 4152−4158.

[18] 许师瑛, 朱熙隆, 洪瑞成, 等. 应用热质量分析法测定华山松林下紫茎泽兰的燃烧性能 [J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(7): 99−107.
Xu S Y, Zhu X L, Hong R C, et al. Determination of the combustion performance of *Eupatorium adenophorum* under *Pinus armandii* forest using the thermal mass analysis method [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(7): 99−107.

[19] 朱熙隆, 王劲, 王秋华, 等. 澳大利亚灌木林火灾研究进展 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2025, 45(2): 212−220.
Zhu X L, Wang J, Wang Q H, et al. A review on bushfire research in Australia [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 2025, 45(2): 212−220.

[20] 丁永全, 李笑笑, 赵凤君, 等. 基于可燃物特征的塞罕坝林场人工林小班森林火险区划 [J]. 林业科学, 2024, 60(11): 107−118.
Ding Y Q, Li X X, Zhao F J, et al. Forest fire risk zoning of artificial forest subcompartment in Saihanba Forest Farm based on fuel characteristics [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(11): 107−118.

[21] 王秋华, 单保君, 龚家平, 等. 滇中地区云南松纯林计划烧除研究 [J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(2): 235−240.
Wang Q H, Shan B J, Gong J P, et al. A study on prescribed burning in pure forest of *Pinus yunnanensis* Franch in central Yunnan Province [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2018, 40(2): 235−240.

[22] Senyanzobe J M V, Mulei J M, Bizuru E, et al. Impact of *Pteridium aquilinum* on vegetation in Nyungwe forest, Rwanda [J]. Heliyon, 2020, 6(9): e04806.

[23] Gaudio N, Balandier P, Dumas Y, et al. Growth and morphology of three forest understorey species (*Calluna vulgaris, Molinia caerulea* and *Pteridium aquilinum*) according to light availability [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(3): 489−498.

[24] Gray B, Toucher M, Savage M, et al. Seasonal evapotranspiration over an invader vegetation (*Pteridium aquilinum*) in a degraded montane grassland using surface renewal [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 40: 101012.

[25] 徐惠敏, 郝经文, 陈乃富, 等. 傅里叶变换中红外光谱结合偏最小二乘法快速测定蕨菜总多糖含量 [J]. 天然产物研究与开发, 2022, 34(11): 1857−1864.
Xu H M, Hao J W, Chen N F, et al. Rapid quantification of polysaccharide in *Pteridium aquilinum* by Fourier transform mid infrared spectroscopy and partial least square method [J]. Natural Product Research and Development, 2022, 34(11): 1857−1864.

[26] Holland J, Aplin P. Super-resolution image analysis as a means of monitoring bracken (*Pteridium aquilinum*) distributions [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 75: 48−63.

[27] 张文文, 闫想想, 王秋华, 等. 计划烧除对云南松纯林可燃物的影响 [J]. 消防科学与技术, 2020, 39(6): 750−753.
Zhang W W, Yan X X, Wang Q H, et al. Effects of prescribed burning on fuel in pure *Pinus yunnanensis* forest [J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(6): 750−753.

[28] 龙腾腾, 李佳琳, 王劲, 等. 计划烧除火强度对滇中云南松纯林的影响 [J]. 林业工程学报, 2022, 7(6): 164−170.
Long T T, Li J L, Wang J, et al. Effect of prescribed fire intensity on the Yunnan pine forest in central Yunnan [J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(6): 164−170.

[29] 何吉明, 李波兰, 李健军, 等. 森林计划烧除对凉山州空气质量的影响 [J]. 中国环境监测, 2025, 41(4): 50−64.
He J M, Li B L, Li J J, et al. The impact of prescribed burning of forest on air quality in Liangshan City [J]. Environmental Monitoring in China, 2025, 41(4): 50−64.

[30] 杨馥羽, 陈奇伯, 黎建强, 等. 计划烧除对云南松林土壤抗剪性能的影响 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 214−221.
Yang F Y, Chen Q B, Li J Q, et al. Effects of prescribed burning on soil shear strength in *Pinus yunnanensis* forests [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 214−221.

[31] 潘慧萍, 金建华, 张山云, 等. 计划烧除对滇中云南松林土壤养分的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(2): 379−386.
Pan H P, Jin J H, Zhang S Y, et al. Effect of prescribed burning on soil nutrient content of *Pinus yunnanensis* forest in central Yunnan Province [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(2): 379−386.

[32] 宋灯辉, 付迪, 黎建强, 等. 云南松林计划烧除地表碳损失量及碳排放量估算 [J]. 生态环境学报, 2023, 32(8): 1376−1383.
Song D H, Fu D, Li J Q, et al. Estimation of surface carbon loss and carbon emission from prescribed burning in *Pinus yunnanensis* forest [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(8): 1376−1383.

[33] 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.
Zhu B Q, Huang S E, Tian J, et al. A study on the physical-chemical properties and flammability of different forest types in semi-tropical monsoon area [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2011, 33(6): 1149−1154.

[34] 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.

[35] 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.

[36] 梁瀛, 张思玉, 努尔古丽, 等. 天山中部林区主要树种理化性质及燃烧性分析 [J]. 林业科学, 2011, 47(12): 101−105.
Liang Y, Zhang S Y, Nurguli, et al. Physical and chemical properties and combustibility of main wood species in the central part of Tianshan Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(12): 101−105.

[37] 张轶超, 周梅, 舒洋, 等. 内蒙古典型荒漠草原主要树种燃烧性研究 [J]. 消防科学与技术, 2023, 42(1): 120−124.
Zhang Y C, Zhou M, Shu Y, et al. Study on combustibility of main tree species in typical desert steppe of Inner Mongolia [J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(1): 120−124.

[38] 张念慈, 刘广菊, 崔文峰. 小兴安岭 12 种灌木的燃烧性研究 [J]. 森林工程, 2025, 41(1): 75−85.
Zhang N C, Liu G J, Cui W F. Combustibility of 12 shrub species in Xiaoxing'anling [J]. Forest Engineering, 2025, 41(1): 75−85.

[39] 郭琦钰, 宁吉彬, 瓮岳太, 等. 黑河地区红松人工林根朽病对其主干燃烧性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(12): 41−45.
Guo Q Y, Ning J B, Weng Y T, et al. Effects of root rottenness of *Pinus koraiensis* plantation in Heihe Area on the combustibility of its trunk [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(12): 41−45.

[40] 张运生, 舒立福, 翟春婕, 等. 滇中地区 9 个树种的连续燃烧性能 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 1−8.
Zhang Y S, Shu L F, Zhai C J, et al. The continuous combustibility of nine tree species in central Yunnan[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(8): 1−8.

[41] 李克, 倪泽仁, 刘晓东, 等. 南京市 5 种常见树种的燃烧性研究 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48(1): 103−110.
Li K, Ni Z R, Liu X D, et al. Flammability of five common tree species in Nanjing [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 103−110.

[42] 田晓瑞, 贺庆棠, 舒立福. 利用锥形量热仪分析树种阻火性能 [J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(1): 48−51.
Tian X R, He Q T, Shu L F. Application of cone calorimeter for the assessment of the fire resistance of tree species [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(1): 48−51.

[43] 李佳琳, 龙腾腾, 王劲, 等. 计划烧除对云南松纯林林下植物的影响 [J]. 消防科学与技术, 2023, 42(3): 392−396.
Li J L, Long T T, Wang J, et al. Effects of prescribed burning on understory plants in pure *Pinus yunnanensis* forest [J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(3): 392−396.

[44] 王劲, 张文文, 王秋华, 等. 云南松林下计划烧除的火行为特征 [J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(4): 828−835.
Wang J, Zhang W W, Wang Q H, et al. Characteristics of fire behavior in prescribed burning under *Pinus yunnanensis* forest [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(4): 828−835.

[45] Hong R C, Zhu X L, Ma C, et al. The effect of prescribed burning on the growth and regeneration of *Pinus yunnanensis* [J]. Forest Ecology and Management, 2025, 578: 122460.

[46] 张运生, 舒立福, 赵凤君, 等. 基于云南松林计划烧除的可燃物调控效果评价研究 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(4): 189−196.
Zhang Y S, Shu L F, Zhao F J, et al. Evaluation of fuel treatments based on prescribed burning in *Pinus yunnanensis* forest [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(4): 189−196.

[47] Ji Y, Huang R, Jia J, et al. Study on the combustion characteristics of seven common broadleaf plant species in southern China [J]. Forests, 2025, 16(1): 44.

（责任编辑　范　娟　李　契
责任编委　臧润国）