

武汉市常见树种凋落枝叶易燃性分析

何琬琬

(1. 华中农业大学 武汉 430000)

摘 要: 研究武汉市 4 种常见树种, 马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、栓皮栎 (*Quercus variabilis* Blume.)、油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 和山胡椒 (*Lindera glauca* (Siebold & Zucc.) Blume) 的凋落枝叶为研究对象, 进行理化性质试验, 采用聚类分析和主成分分析将凋落物分难燃、可燃、易燃三个等级。结果表明: 油茶叶及小枝的热值低、燃点高、点燃时间长、木质素含量低, 表现出较强的阻燃性能, 同时, 与油茶叶及小枝混合的树种, 均表现阻燃性能提升; 山胡椒枝的燃点高、点燃时间长, 燃烧性较弱, 但其落叶却相反, 可见山胡椒落叶易燃, 小枝耐火; 马尾松落叶凋落枝热值高、燃点低、点燃时间快、木质素和纤维素含量高, 易燃性较强, 与马尾松枝叶混合的树种, 均有易燃趋势。油茶凋落枝叶难燃, 可作为森林防火树种。由马尾松组成的混交林, 具有较高火灾风险, 应重点监管。该研究可为武汉市防火树种筛选以及防火林带的建设提供参考。

关键词: 林火; 凋落枝叶; 理化性质; 易燃性; 武汉市

Analysis of flammability of common tree species in Wuhan City

Abstract: The physical and chemical properties of four common tree species, *Pinus massoniana* Lamb., *Quercus variabilis* Blume, *Camellia oleifera* Abel., and *Lindera glauca* (Siebold & Zucc.) Blume, in Wuhan City were studied. Cluster analysis and principal component analysis were used to divide the litter into three grades: refractory, flammable and flammable. The results showed that oil tea and twigs had low calorific value, high ignition point, long ignition time and low lignin content, showing strong fire resistance. At the same time, the fire resistance of the tree species mixed with oil tea and twigs was improved. The burning point of the branch is high, the ignition time is long, and the flammability is weak, but the fallen leaves are the opposite. It can be seen that the fallen leaves of the pepper are flammable and the twigs are fire-resistant; *p.massoniana* leaf litter branches have high calorific value, low ignition point, fast ignition time, high lignin and cellulose content, and strong flammability. Tree species mixed with *P.massoniana* branches and leaves have a flammable trend. The litter leaves of *Camellia oleifera* are flame retardant and can be used as forest fire prevention tree species. The mixed forest composed of *Pinus massoniana* has a high fire risk and should be supervised. This study can provide reference for the selection of fire-resistant tree species and the construction of fire-resistant forest belts in Wuhan..

Key Words: forest fire; littering branches and leaves; physicochemical properties; flammability; wuhan City

火被广泛认为是跨越许多陆地生态系统的重要生态过程。火灾通常从枯枝落叶层开始, 产生地表火。地表火为地表正上方燃烧, 并由靠近地面的凋落物(如叶凋落物和枝凋落物)传播的火。森林燃烧必须具备 3 个要素, 即森林可燃物、氧气和一定温度, 而森林凋落物是森林火灾发生的物质基础, 其理化性质直接影响森林燃烧性及其火行为特点。因此, 对凋落物理化性质进行测定分析, 是现代林火管理中重要又基础的工作。

树种防火能力强弱取决于易燃性(杜君, et al. 2019), 易燃性通常是指野外燃料的点燃和燃烧能力, 被认为是一种“生态位构建”性状, 会增加邻近植物的死亡风险。植物凋落物的可燃性取决于单个植物性状的直接“后生活”效应和不同植物物种和器官的凋落物之间的性状相互作用。

凋落物是地表可燃物层的主要组成部分, 是许多林地和森林生态系统中火行为的强烈驱动者。大多数研究假设树叶控制凋落物层的可燃性。然而, 在森林中, 不仅树叶, 而且树枝凋落物也一直大量存在。在一些森林类型中, 如桉树林, 树皮脱落也是地表凋落物层的重要组成部分(云丽丽, et al. 2024)。枯叶、树枝(直径<6毫米)和树皮混合在一起形成细凋落物层, 正是这些凋落物一起对地表火灾行为贡献最大。叶子和树枝凋落物颗粒的大小、形状和密度差异很大。为了充分了解物种对凋落物可燃性的影响, 不仅需要考虑叶子, 还需要考虑叶枝混合物, 因为森林中应始终存在相同木本物种的叶枝混合物。

目前对易燃性的评价指标主要有平衡含水率、木质素含量、纤维素含量、粗灰分含量、挥发油等理化指标, 叶面积、叶卷曲度、比叶面积等生物学特性, 热值、燃点、燃烧火焰高度、燃烧蔓延速度、热释放速率等燃烧指标(闫晶, et al. 2024)。先前对不同树种易燃性已有一定研究, 如彭徐剑等对南方防火树种含水率、灰分含量、热值、燃点的研究(彭徐剑, et al. 2024); 金森等利用一维和三维易燃性评价体系对南方树种叶片易燃性的研究(董迪, et al. 2024); 黎书会等以凉山州主要经济树种为研究对象, 通过测定含水率、热值、燃点、灰分等指标综合评判其防火性, 发现胡桃、桑为优良的防火树种, 油茶、杨梅等经济树种的防火性较差(黎书会, et al. 2024)。然而, 凋落枝叶混合易燃性的相关研究相对较少。因此, 关于凋落枝叶及混合的易燃性研究需加强。

1 材料与方法

1.1 材料来源

2024年3月, 在武汉市洪山区狮子山采集马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume.)、油茶(*Camellia oleifera* Abel.)和山胡椒(*Lindera glauca* (Siebold & Zucc.) Blume)4个树种的叶和枝凋落物。通过设置大小为10m×10m标准地, 每个树种调查5个标准地。每个标准地随机选取4个1m×1m小样方, 对于每个物种, 从林下地表面收集不少于1kg的凋落物落叶和小枝(直径0.8cm以下)带回实验室, 用信封将样品装好放入烘箱, 在85℃的烘箱内烘至恒重后, 一半用粉碎机粉碎, 过80目筛, 制成试样备用;一半留于平衡含水率实验。

1.2 物理性质测定

1.2.1 平衡含水率的测定

将采集的凋落叶置于电热鼓风箱中烘干至恒重, 每种凋落叶取M₀g, 并将其浸泡在水中, 用塑料板盖压确保凋落叶全部浸入水中, 充分浸泡24h后将其沥干放置于恒温恒湿试验箱中(温度25℃, 湿度30%), 每两小时记录一次质量变化, 当样品平衡含水率连续两次之间的测量的差值小于1%时, 则认为此时凋落叶的水分含量已达到饱和状态, 记录此时的样品质量为M₁。每个树种凋落叶重复4次, 按公式

(1) 计算平衡含水率(W):

$$W = (M_1 - M_0) / M_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: W为待测样品平衡含水率; M₀为初始称取待测样品的质量; M₁为待测样品水分饱和状态下的质量。

1.2.2 燃点和点燃时间的测定

将烘干后的样品充分研磨, 过80目筛。取充分研磨后的样品1.2g, 使用ZY6069点着温度测定仪(ZY6069, 鹤壁市恒信电子有限公司)对样品燃点进行测定, 燃烧时间超过5s时的最低温度为该样品的燃点, 样品加热到点燃消耗的时间为点燃时间, 每个样品重复测定4次。

1.2.3 热值的测定

将烘干后的样品充分研磨, 过80目筛。取充分研磨后的样品1.2g, 使用高精度热值检测仪(ZDH W-9000F, 鹤壁市恒信电子有限公司)对热值直接测定读数, 每个样品重复测定4次。

1.3 化学性质测定

1.3.1 灰分

取研磨后的待测样品 X_0 g, 将样品放入坩埚中并记录待测样品和坩埚的总质量 X_1 。先将装有样品的坩埚置于电炉上持续加热使坩埚内的样品完全炭化, 然后将装有炭化样品的坩埚至于马弗炉中 650°C 持续加热 4 h。取出后放置于干燥器中, 冷却后记录坩埚和样品的总质量 X_2 , 每个样品重复测定 4 次, 按照公式 (2) 计算灰分含量:

$$A = (X_2 - X_1) / X_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中: A 为待测样品的灰分含量; X_0 为待测样品的质量; X_1 为测量前样品和坩埚的总质量; X_2 为测量后样品和坩埚的总质量。

1.3.2 木质素、纤维素

取充分研磨后的待测样品 C_0 g 放入消煮管内, 向消煮管中加入 80 mL CTAB 溶液 (CTAB 溶液: 十六烷基三甲基溴化铵 (Hexadecyl trimethyl ammonium Bromide) 20 g、54 mL 硫酸 ($\rho = 1.84 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$)、数滴正辛醇溶于 1 L 蒸馏水中)。将装有待测样品和 CTAB 溶液的消煮管放入石墨消解仪 169°C 消煮 1 h, 消煮完成后将消煮管内的样品转移至砂芯漏斗 (G3 规格, 50 mL)。用丙酮反复抽洗样品直至抽滤液澄清透明, 将装有样品的砂芯漏斗放置在烘箱内 170°C 烘干 1 h, 冷却后记录砂芯漏斗和样品的质量为 C_1 。加入 72% 的 H_2SO_4 使其完全浸泡烘干后的样品, 再次用丙酮滴定至抽滤液澄清。在烘箱中 170°C 烘干 1 h, 冷却后记录砂芯漏斗和样品的质量为 C_2 。最后将装有样品的砂芯漏斗放入马弗炉中 550°C 加热 2 h 至恒重, 放入干燥器中冷却后记录砂芯漏斗和样品的质量为 C_3 。每个样品重复 4 次, 按公式 (3) 计算样品中木质素含量; 按公式 (4) 计算样品中纤维素含量:

$$X = (C_2 - C_1) / C_0 \times 100\% \quad (3)$$

$$Y = (C_3 - C_2) / C_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中: X 为待测样品木质素含量; Y 为待测样品纤维素含量。 C_1 为第 1 次烘干后砂芯漏斗和样品的质量; C_2 为第 2 次烘干后砂芯漏斗和样品的质量; C_3 为第 3 次烘干后砂芯漏斗和样品的质量。

1.4 燃烧性计算

基于植物叶片的理化性质和生态学特征, 将平衡含水率、灰分、木质素、纤维素、热值、燃点 6 种理化性质作为燃烧性指标, 使用 Excel 2019 对原始数据进行处理。采用 IBM SPSS 20.0 进行单因素方差分析, 采用 Duncan 多重比较数据差异, 采用主成分分析法对燃烧性进行排序并通过聚类分析将燃烧性综合指标划分为可燃、较易燃、易燃 3 个等级, 以便于对凋落物的混合燃烧性进行分类和评估。在 Origin 2022 中采用双因素相关性分析分析各易燃性指标间的相关性。

2 结果与分析

2.2 物理性质测定

2.2.1 相同树种和不同树种枝叶混合平衡含水率的测定

同一树种凋落枝叶的平衡含水率差异显著 ($P < 0.05$), 范围在 4.00% ~ 59.00% 之间 (图 1a)。山胡椒凋落叶平衡含水率最高。栓皮栎叶、油茶叶与马尾松枝、山胡椒枝、栓皮栎枝、油茶枝平衡含水率中等, 范围在 10.00% ~ 28.00% 之间。马尾松凋落叶平衡含水率最低, 与其他树种凋落枝叶平衡含水率差异显著 ($P < 0.05$)。

不同树种凋落物混合的平衡含水率差异显著 ($P < 0.05$) (树种混合详细见下表 2), 范围在 4.00% ~ 55.00% 之间 (图 1b)。混合之后, 栓皮栎叶山胡椒叶混合的平衡含水率最高。栓皮栎枝与山胡椒叶混合平衡含水率最低, 与其他树种凋落枝叶平衡含水率差异显著 ($P < 0.05$)。

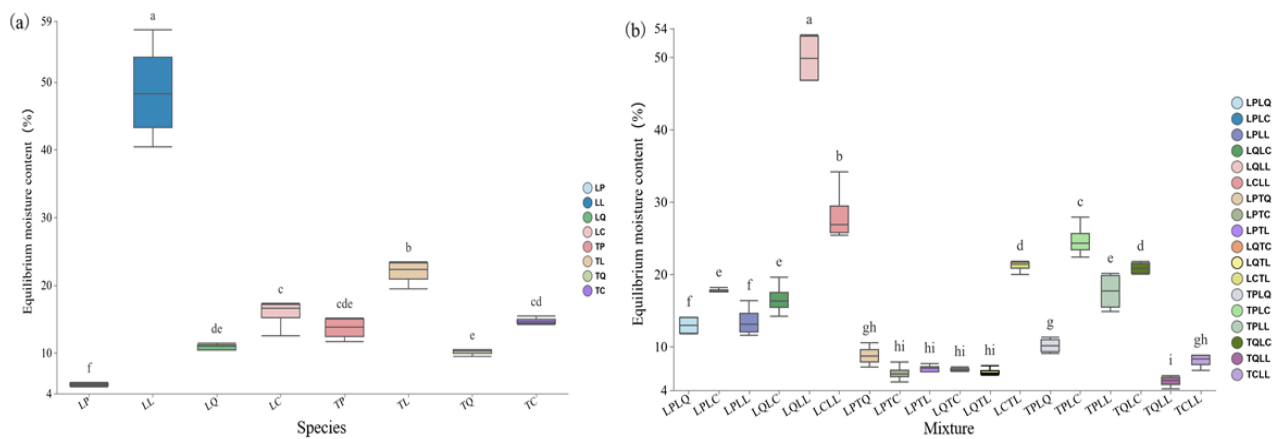


图1 相同数种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合的平衡含水率

Fig. 1 The equilibrium moisture content of the same number of litter branches and leaves and the mixed litter branches and leaves of different tree species.

2.2.2 相同树种和不同树种枝叶混合燃点和点燃时间的测定

同一树种凋落枝叶燃点在 195.00 ~ 265.00℃之间 (图 2a), 山胡椒凋落枝燃点最高, 且显著高于其他树种凋落叶燃点 ($P < 0.05$)。马尾松凋落叶燃点最低, 相比燃点最高树种的凋落叶低 50℃ 以上。相比, 凋落物点燃时间在 49.00 ~ 156.00 s 之间 (图 2c), 其中山胡椒枝点燃时间最长, 山胡椒、马尾松凋落叶的点燃时间短。

不同树种凋落枝叶混合的燃点在 200.00 ~ 260.00℃之间 (图 2b), 油茶叶与山胡椒枝、油茶叶栓皮栎枝燃点最高, 且显著高于其他树种凋落枝叶燃点 ($P < 0.05$)。马尾松叶栓皮栎叶燃点、马尾松叶山胡椒叶燃点最低, 相比燃点最高树种的凋落叶低 50℃ 以上。相比, 凋落物混合的点燃时间在 49.00 ~ 156.00 s 之间 (图 2d), 其中山胡椒凋落枝点燃时间最长, 山胡椒、马尾松凋落叶的点燃时间短。

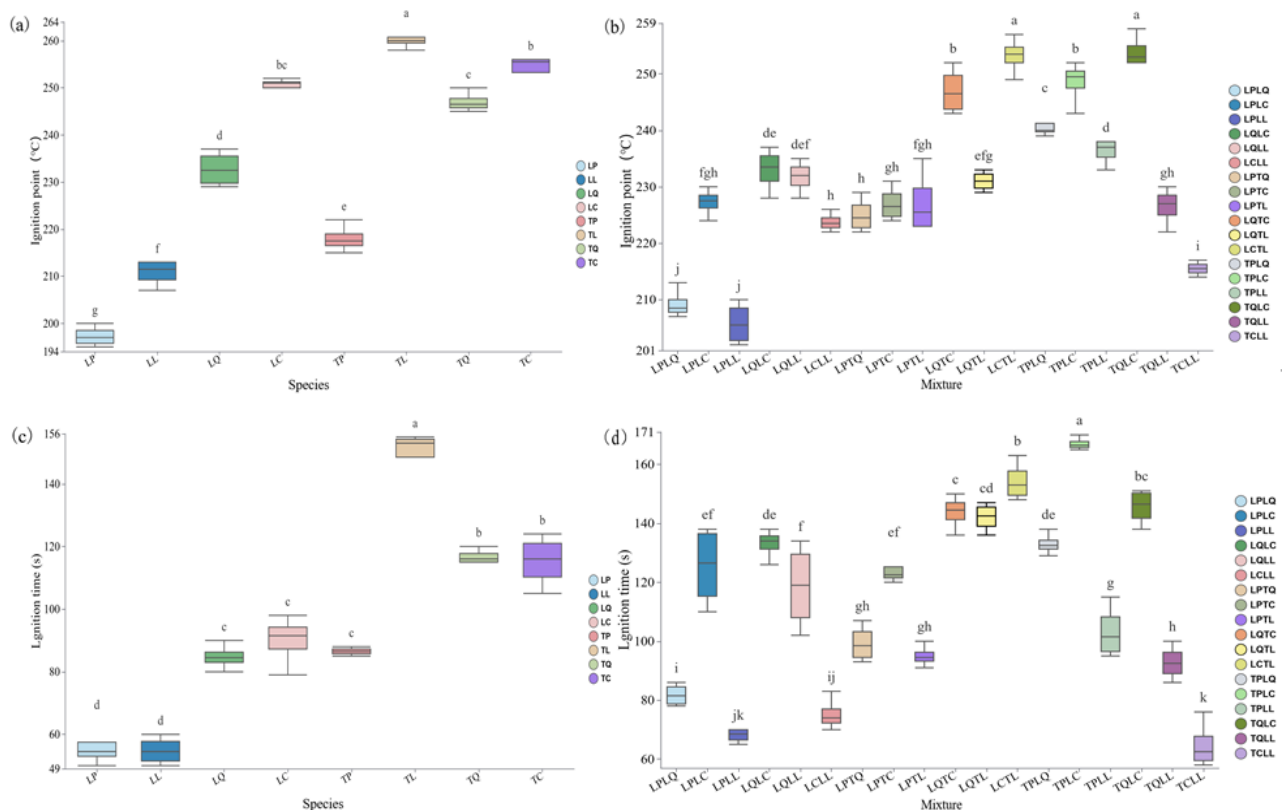


图2 相同树种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合的燃点与点燃时间

Fig. 2 The ignition point and ignition time of the same tree species litter and the mixed litter of different tree species.

es litter

2.2.3 相同树种和不同树种枝叶混合热值的测定

同一树种凋落枝叶热值差异显著 ($P < 0.05$) (图 3a), 热值的范围在 17000 ~ 23000 KJ/g。马尾松的热值最高; 油茶的热值最低。不同树种凋落枝叶混合的热值差异显著 ($P < 0.05$) (图 3b), 热值的范围在 17700 ~ 21000 KJ/g。马尾松栓皮栎凋落叶混合的热值最高; 油茶叶山胡椒叶、油茶叶山胡椒枝的热值最低。

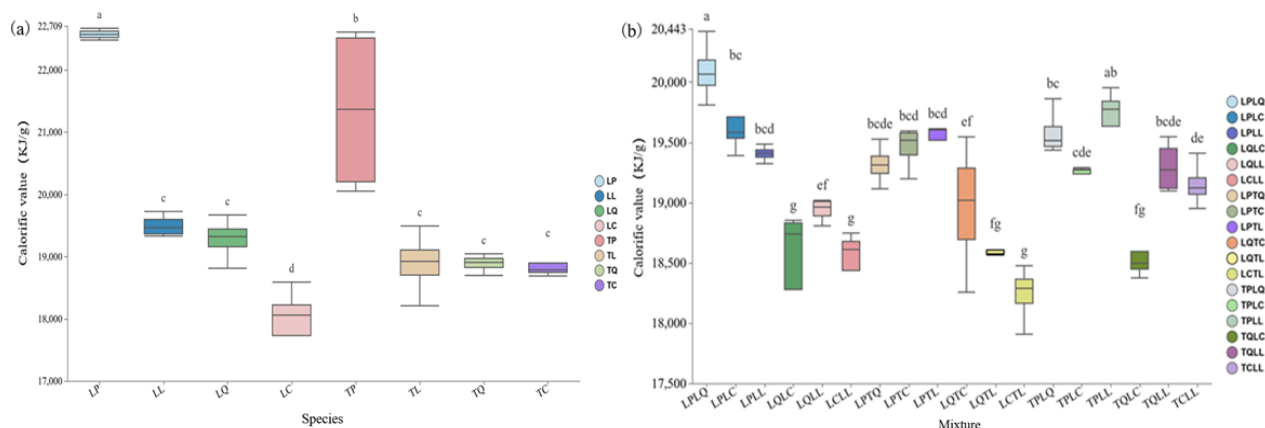


图 3 相同树种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合的热值

Fig. 3 Calorific value of mixture of litter branches and leaves of the same tree species and litter branches and leaves of different tree species

2.3 化学性质测定

2.3.1 相同树种和不同树种枝叶混合灰分的测定

同一树种凋落枝叶中, 灰分含量差异无显著 ($P < 0.05$) (图 4a)。不同树种凋落物混合中, 栓皮栎叶山胡椒叶混合、油茶叶山胡椒叶混合的灰分含量显著高于其他树种凋落物混合灰分含量 ($P < 0.05$) (图 4b)。

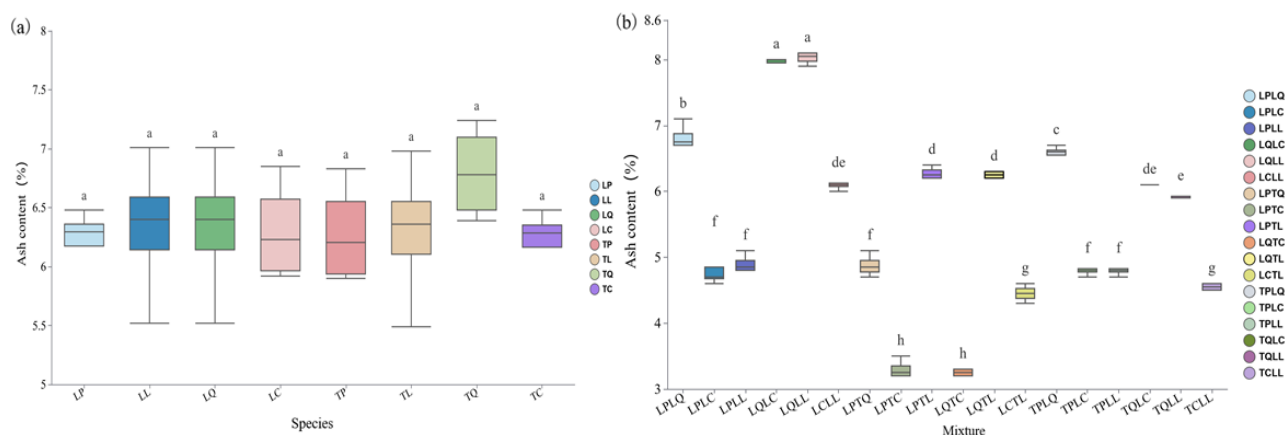


图 4 相同树种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合的灰分

Fig. 4 The ash content of litter branches and leaves of the same tree species and mixed litter branches and leaves of different tree species

2.3.2 相同树种和不同树种枝叶混合木质素的测定

同一树种凋落枝叶木质素含量差异显著 ($P < 0.05$) (图 5a), 其范围在 10.00% ~ 40.00%之间。马尾松凋落叶木质素含量最高, 显著高于其他树种凋落叶木质素含量 ($P < 0.05$)。油茶凋落叶木质素含量最低, 相比木质素含量最高的马尾松低 30.0%。

不同树种凋落混合木质素含量差异显著 ($P < 0.05$) (图 5b), 其范围在 15.00% ~ 45.00%之间。马尾

松枝山胡椒叶木质素含量最高，显著高于其他树种凋落物混合木质素含量 ($P < 0.05$)。油茶叶栓皮栎枝木质素含量最低。

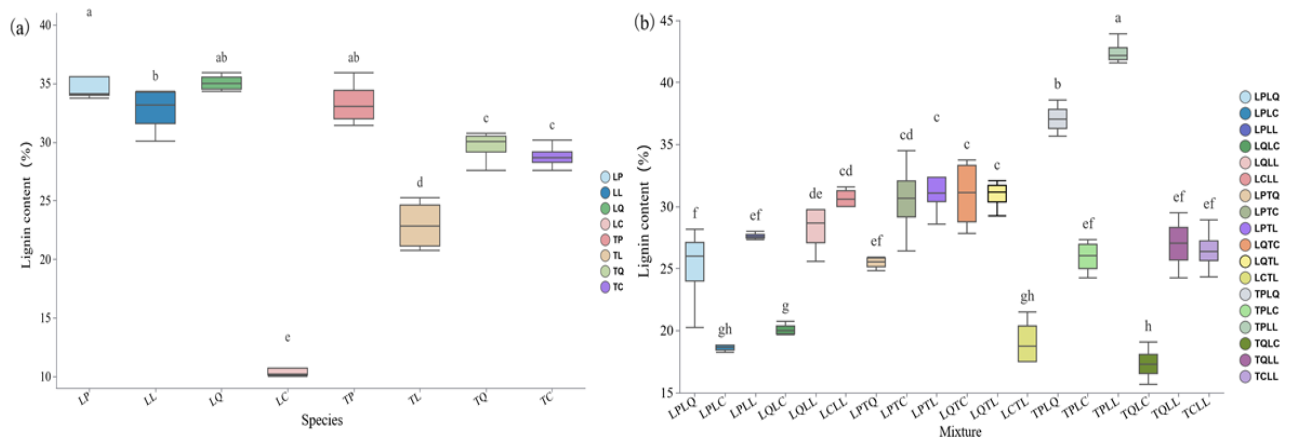


图 5 相同树种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合的木质素

Fig. 5 Lignin of litter leaves of the same tree species and mixed litter leaves of different tree species

2.3.3 相同树种和不同树种枝叶混合纤维素的测定

同一树种凋落枝叶纤维素含量差异显著 ($P < 0.05$) (图 6a)，其范围在 7.00% ~ 50.00%之间。马尾松叶纤维素含量最高，显著高于其他树种凋落叶纤维素含量 ($P < 0.05$)。栓皮栎凋落叶纤维素含量最低，相比纤维素含量最高的马尾松低 40.0%。

不同树种凋落物混合纤维素含量差异显著 ($P < 0.05$) (图 6b)，其范围在 3.00% ~ 21.00%之间。油茶叶山胡椒枝、油茶枝山胡椒叶纤维素含量最高，显著高于其他树种凋落物混合纤维素含量 ($P < 0.05$)。油茶叶山胡椒叶纤维素含量最低。

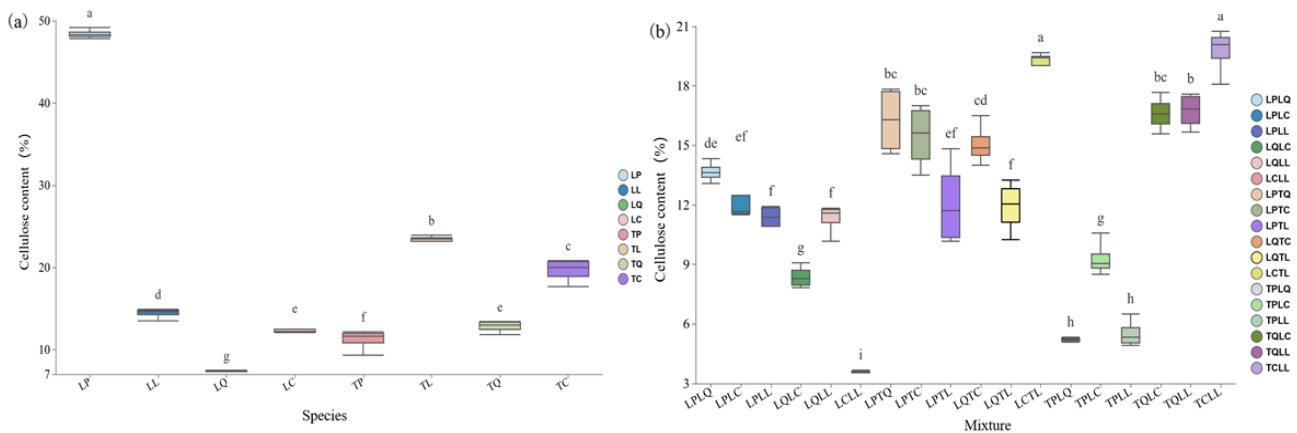


图 6 相同树种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合的纤维素

Fig. 6 Cellulose in the mixture of litter branches and leaves of the same tree species and litter branches and leaves of different tree species.

2.3.4 相同树种和不同树种枝叶混合的易燃性指标相关性分析

在测定的 7 个易燃性指标中，平衡含水率与热值、灰分含量、木质素含量和纤维素含量正相关，与燃点和点燃时间负相关 (图 7)。热值和其他易燃性指标存在较强的相关性，与燃点极显著负相关 ($P < 0.001$)；与木质素含量极显著正相关 ($P < 0.01$)。燃点和点燃时间极显著正相关 ($P < 0.001$)。木质素含量与纤维素含量显著负相关 ($P < 0.05$)。相比其他易燃性指标，灰分含量和平衡含水率与其他易燃性指标间相关性不显著 ($P > 0.05$)。

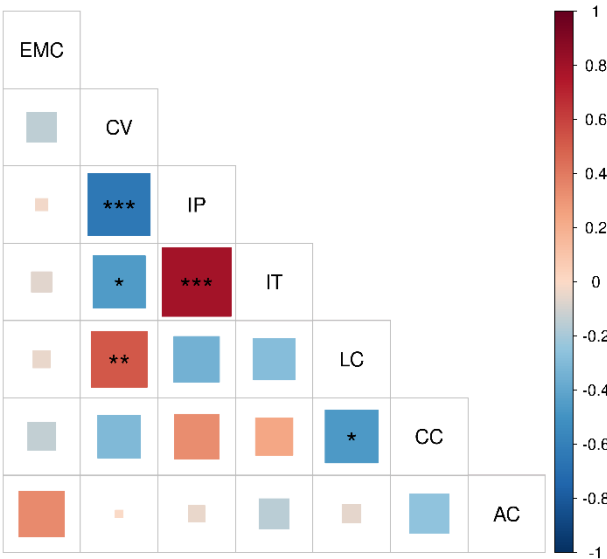


图 7 相同树种和不同树种枝叶混合的易燃性指标相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of flammability index of mixed branches and leaves of the same tree species and different tree species

注:EMC: 平衡含水率; CV: 热值; IP: 燃点; IT: 点燃时间; LC: 木质素含量; CC:纤维素含量; AC: 灰分含量。* P≤0.05, **P≤0.01, *** P≤0.001。
Note: EMC: Equilibrium moisture content; CV: Caloric value; IP: Ignition point; IT: Ignition to time; LC: Lignin content; CC: cellulose content AC: Ash content. * P≤0.05, **P≤0.01, ***P≤0.001.

2. 4 相同树种和不同树种枝叶混合主成分分析

对测定的平衡含水率、热值、燃点、点燃时间、灰分含量、木质素含量、纤维素含量 7 个易燃性指标提取出 3 个主成分分别为 F1、F2 和 F3，3 个主成分的方差解释率分别为 39.018%、20.490%和 14.550%。根据成分矩阵（表 1）参数建立其 3 个主成分与 7 个易燃性指标间的等式关系，结果如下：

$$Y_1 = -0.022X_1 - 0.461X_2 + 0.518X_3 + 0.467X_4 - 0.402X_5 + 0.359X_6 - 0.097X_7$$
$$Y_2 = 0.655X_1 - 0.218X_2 + 0.060X_3 - 0.038X_4 - 0.137X_5 - 0.253X_6 + 0.660X_7$$
$$Y_3 = -0.080X_1 + 0.038X_2 + 0.379X_3 + 0.500X_4 + 0.540X_5 - 0.553X_6 - 0.013X_7$$
$$Y = 0.390Y_1 + 0.205Y_2 + 0.146Y_3$$

式中：X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7 分别代表平衡含水率、热值、燃点、点燃时间、灰分含量、木质素含量、纤维素含量 7 个指标原始数据后的标准化值，Y1、Y2、Y3 分别为主成分 F1、F2 和 F3 的得分，Y 代表最终的主成分得分。

通过主成分分析计算 26 种树种与混合树种凋落枝叶易燃性综合得分（表 2），凋落叶易燃性综合得分越高，说明凋落叶易燃性越强。在 26 种树种凋落叶综合易燃性得分中，混合的油茶叶山胡椒枝、栓皮栎叶油茶枝、马尾松枝油茶叶与单种油茶叶、油茶枝、山胡椒枝综合易燃性得分最高，易燃性较强，马尾松叶、马尾松枝易燃性综合得分最低，易燃性较弱。

表 1 相同树种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合易燃性成分矩阵

Table 1 The flammability component matrix of litter leaves of the same tree species and the mixed flammability component matrix of litter leaves of different tree species

指标 Index	成份 1 Component 1	成份 2 Component 2	成份 3 Component 3
平衡含水率 Equilibrium moisture content	-0.037	0.784	-0.081
热值 Caloric value	-0.762	-0.261	0.038
燃点 Ignition point	0.856	0.072	0.383
点燃时间 Ignition to time	0.772	-0.046	0.505
灰分含量 Ash content	-0.665	-0.164	0.545

木质素 Lignin	0.594	-0.303	-0.558
纤维素 Cellulose	-0.160	0.791	-0.013

表 2 相同树种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合综合得分与易燃性等级分析

Table 2 Analysis of comprehensive score and flammability grade of litter branches and leaves of the same tree species and litter branches and leaves of different tree species.

树种 Species and Mixture Species	易燃性综合得分 Flammability of comprehensive score	综合排序 comprehensive sorting	易燃性等级 Flammability level
Leaf <i>Pinus massoniana</i>	-1.91	26	I
Leaf <i>Lindera glauca</i>	-0.97	24	II
Leaf <i>Quercus variabilis</i>	-0.36	20	II
Leaf <i>Camellia oleifera</i>	0.66	6	III
Twig <i>Pinus massoniana</i>	-1.03	25	I
Twig <i>Lindera glauca</i>	0.89	4	III
Twig <i>Quercus variabilis</i>	0.23	11	III
Twig <i>Camellia oleifera</i>	0.44	7	III
Leaf <i>Pinus massoniana</i> + Leaf <i>Quercus variabilis</i>	-0.86	23	II
Leaf <i>Pinus massoniana</i> + Leaf <i>Camellia oleifera</i>	0.25	10	III
Leaf <i>Pinus massoniana</i> + Leaf <i>Lindera glauca</i>	-0.63	22	II
Leaf <i>Quercus variabilis</i> + Leaf <i>Camellia oleifera</i>	0.21	12	III
Leaf <i>Quercus variabilis</i> + Leaf <i>Lindera glauca</i>	-0.2	16	II
Leaf <i>Camellia oleifera</i> + Leaf <i>Lindera glauca</i>	-0.31	18	II
Leaf <i>Pinus massoniana</i> + Twig <i>Quercus variabilis</i>	-0.01	14	II
Leaf <i>Pinus massoniana</i> + Twig <i>Camellia oleifera</i>	0.34	8	III
Leaf <i>Pinus massoniana</i> + Twig <i>Lindera glauca</i>	-0.36	21	II
Leaf <i>Quercus variabilis</i> + Twig <i>Camellia oleifera</i>	0.95	2	III
Leaf <i>Quercus variabilis</i> + Twig <i>Lindera glauca</i>	0.29	9	III
Leaf <i>Camellia oleifera</i> + Twig <i>Lindera glauca</i>	1.28	1	III
Twig <i>Pinus massoniana</i> + Leaf <i>Quercus variabilis</i>	0	13	II
Twig <i>Pinus massoniana</i> + Leaf <i>Camellia oleifera</i>	0.89	5	III
Twig <i>Pinus massoniana</i> + Leaf <i>Lindera glauca</i>	-0.15	15	II
Twig <i>Quercus variabilis</i> + Leaf <i>Camellia oleifera</i>	0.93	3	III

Twig <i>Quercus variabilis</i> + Leaf <i>Lindera glauca</i>	-0.2	17	II
Twig <i>Camellia oleifera</i> + Leaf <i>Lindera glauca</i>	-0.35	19	II

2.5 聚类分析

通过系统聚类将 26 种相同树种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合的易燃性分为易燃（I）、可燃（II）、难燃（III）三个等级，马尾松叶、马尾松枝易燃（I），易燃性最强；马尾松枝栓皮栎叶、马尾松叶栓皮栎枝、马尾松枝山胡椒叶、栓皮栎叶山胡椒叶、栓皮栎枝山胡椒叶、油茶叶山胡椒叶、油茶枝山胡椒叶、栓皮栎叶、马尾松叶山胡椒枝、马尾松叶栓皮栎叶、山胡椒叶可燃（II）；油茶叶山胡椒枝、栓皮栎叶油茶枝、栓皮栎枝油茶叶、马尾松枝油茶叶、马尾松叶油茶枝、马尾松叶油茶叶、栓皮栎叶山胡椒枝、栓皮栎叶油茶叶与单种油茶叶、油茶枝、山胡椒枝、栓皮栎枝难燃（III），易燃性较弱。

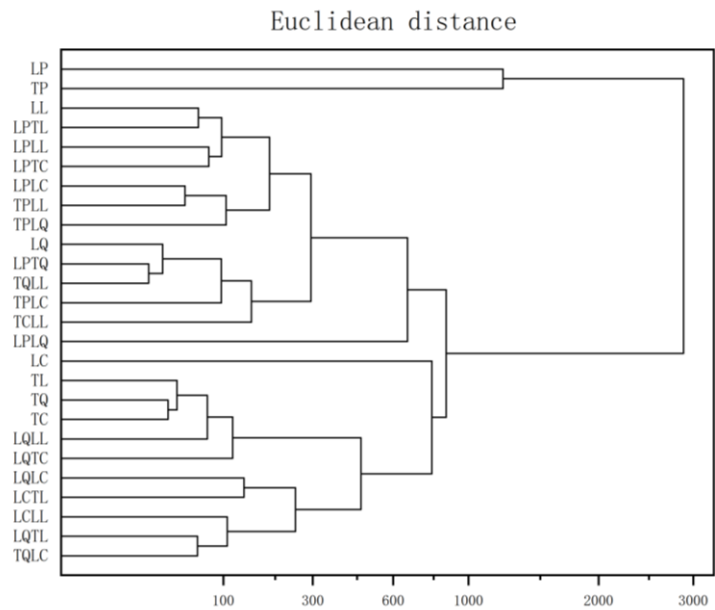


图 8 相同树种凋落枝叶和不同树种凋落枝叶混合易燃性聚类分析
Fig.8 Cluster analysis of mixed flammability of litter branches and leaves of the same tree species and litter branches and leaves of different tree species

2 结论

森林火灾的发生一般由地表可燃物燃烧引发地表火，通过适宜火环境蔓延至地上部分变成林冠火，从而对城市造成巨大的生态和经济损失(潘登, et al. 2017)。在地表可燃物的组成部分中，具有重要影响(陈增鸿 2012)。本研究通过对武汉市城市森林常见树种凋落枝叶易燃性分析，测定凋落枝叶易燃性指标对易燃性进行综合评估，发现不同树种凋落枝叶易燃性不同。马尾松叶、马尾松枝易燃性最强；油茶叶山胡椒枝、栓皮栎叶油茶枝、栓皮栎枝油茶叶、马尾松枝油茶叶、马尾松叶油茶枝、马尾松叶油茶叶、栓皮栎叶山胡椒枝、栓皮栎叶油茶叶与单种油茶叶、油茶枝、山胡椒枝、栓皮栎枝易燃性较弱。试验为该研究可为武汉市防火树种筛选以及防火林带的建设提供参考。

凋落物的理化性质是评判易燃性的重要依据(钟金, et al. 2024)。平衡含水率直接影响凋落叶的易燃性和火灾的蔓延速度(潘登, et al. 2017)。平衡含水率越高，凋落叶在燃烧时水分蒸发越慢，越不容易进入燃烧状态，其抗火性越好。在本研究中，不同树种凋落叶的平衡含水率差异显著 ($P<0.05$)，山胡椒凋落叶平衡含水率较高，而马尾松凋落叶的平衡含水率最低，这是由于叶片功能性状和遗传特性的差异，造成树种凋落叶失水和保水能力不同(郑文辉, et al. 2014)。热值在火蔓延上有重要影响，热值越高，释放的能量越多，易燃性越强(张念慈, et al.)。燃点是判断树种易燃性的首要条件(刘韩, et al. 2023)。凋落叶燃点越低、点燃时间越快，易燃性越强。木质素、纤维素是植物细胞壁的主要组成成分，属于可燃物

质的一种,当发生森林火灾时,温度升高会导致木质素、纤维素发生热分解反应,释放大量热量,导致林火的进一步蔓延(宋林姝, et al. 2023)。马尾松凋落叶凋落枝热值高、燃点低、点燃时间快、木质素和纤维素含量高,易燃性较强,这陈涤非与等对马尾松易燃性强的研究结果一致(陈涤非, et al. 2023)。灰分含量越高,火强度越弱,燃烧性能越差(张念慈, et al.)。本研究中栓皮栎叶山胡椒叶混合、油茶叶山胡椒叶混合的灰分含量最高,显著高于其余树种凋落叶的灰分含量;此外,油茶热值低、燃点高、点燃时间长、木质素含量低,这是油茶凋落叶凋落枝易燃性差的重要原因,这与油茶防火树种选择一致(刘小燕, et al. 2023)。

相关性分析结果表明,燃点和热值极显著负相关,周翔等对新疆天山东部森林地表可燃物的热值研究中发现可燃物的燃点和热值存在极显著的相关关系,这与本研究的结果基本一致(周翔, et al.2023)。通过主成分分析计算凋落叶易燃性综合得分发现马尾松凋落枝叶具有较强的易燃性。

除了测定凋落叶的理化性质外,还需把凋落物载量作为评价易燃性的重要指标,地表凋落物的大量积累为森林火灾的发生提供了物质条件(王康锋 and 罗永忠 2023)。此外,立地条件和林分因子在一定程度上会影响森林火灾的发生和蔓延(陈飞, et al. 2024)。在今后的森林火灾预防和管理工作中,应改更加全面考虑森林火灾发生的影响因素,以期更好地预防城市森林火灾的发生。

参 考 文 献

- 杜君,王明霞,尹赛男,王雅钧,季鑫,曲航 et al. 2019 蒙古栎近熟林不同部位抗火性分析. 森林防火 (04), 24-29.
- (DU Jun, NANG Mingxia, YIN Sainan, et al. 2019. Fire resistance analysis of different parts of near mature forest of *Quercus mongolica*. Journal of Wildland Fire Science. (04), 24-29.)
- 云丽丽,张慧东,易达 and 黄夏. 2024 2 种典型森林凋落物动态变化及其分解特征研究. 辽宁林业科技 (03), 11-16+68.
- (YUN Lili, ZHANG Huidong, YID, et al. 2024. Dynamics and decomposition characteristics of litter of two typical forest species. Liaoning Forestry Science and Technology. (03), 11-16+68.
- 闫晶,宋林姝,李秉玲 and 刘燕. 2024 6 种北京常见草本植物燃烧性分析与评价. 应用生态学报, 35 (02), 363-370.
- (YAN Jing, SONG Linshu, LI Bingling, et al. 2024. Analysis and evaluation of the burning characteristics of six commonly used herbaceous species in Beijing. Chinese Journal of Applied Ecology. 35 (02), 363-370.)
- 彭徐剑,刘讯,华国莉,丁波,武燕,张延威 et al. 2024 大娄山典型林分灌木地上载量影响因子及预测模型. 中南林业科技大学学报, 44 (03), 108-116+125.
- (PENG Xujian, LIU Xun, HUA Guoli, et al. 2024. Influencing factors and prediction model of shrub uploading of typical stands in Dalou mountain. Journal of Central South University of Forestry & Technology. 44 (03), 108-116+125.)
- 董迪,姚鳗卿,陈芃序,李东明,李屹楠,郭丽 et al. 2024 园林树种抗火性研究现状. 山东林业科技, 54 (03), 112-120.
- (DONG Di, YAO Mangqing, CHEN Pengxu, et al. 2024. Research Status of Fire Resistance of Landscape Tree Species. Journal of Shandong Forestry Science and Technology. 54 (03), 112-120.)
- 黎书会,吴艳,孙志东,陈继恩,赢登宇,黄跃跃 et al. 2024 凉山州 15 种主要经济树种的防火性能. 应用生态学报, 35 (01), 203-211.
- (LI Shuhui, WU Yan, SUN Zhidong, et al. 2024. Fire resistance of 15 main economic tree species in Liangshan Prefecture, Sichuan, China. Chinese Journal of Applied Ecology. 35 (01), 203-211.)
- 潘登,张合平,潘高 and 易浪. 2017 桂西南松栎林火行为研究及碳排放计量. 自然灾害学报, 26 (05), 51-61.
- (PAN Deng, ZHANG Heping, PAN Gao, et al. 2017. Fire behavior and carbon emission of Pine Oak Forests in Southwest Guangxi of China. Journal of Natural Disasters. 26 (05), 51-61.)
- 陈增鸿. 2012 海岸带防护林恢复过程中凋落物的组成及养分特征硕士.
- (Chen zenghong. The coastal shelter forest restoration process of litter and composition of the nutrient characteristics.)
- 钟金,朱宇颐,秦超,桂林华,张文,李绪佳 et al. 2024 四川省 70 种常见树种枝叶燃烧性评价. 安徽农业科学, 52 (19), 103-109+117.
- (ZHONG Jin, ZHU Yu-yi, QIN Chao, et al. 2024. Evaluation of Branch and Leaf Flammability of 70 Common Tree Species in Sichuan Province. Journal of Anhui Agricultural Sciences. 52 (19), 103-109+117.)

- 郑文辉, 林开敏, 徐昇, 赵长存, 蔡锰柯 and 郭玉硕. 2014 7 种不同树种凋落叶持水性能的比较研究. 水土保持学报, 28 (01), 88-91.
- (ZHENG Wen-hui, LIN Kai--min, XU Bian, et al. 2014. Comparative Study of Water-holding Capacity of Litter in Seven Different Trees' Species. Journal of Soil and Water Conservation. 28 (01), 88-91.)
- 张念慈, 刘广菊 and 崔文峰. 小兴安岭 12 种灌木的燃烧性研究. 森林工程, 1-13.
- (ZHANG Nianci, LIU Guangju, CUI Wenfeng. Combustibility of 12 Shrub Species in Xiaoxing'anling. Forest Engineering. 1-13)
- 刘韩, 李淑婷, 吴富雨, 兰常军, 崔兴雷, 郑江坤 et al. 2023 川西地区常见森林类型枯落物燃烧性状差异分析. 安徽农业科学, 51 (24), 97-100.
- (LIU Han, LI Shu-ting, WUFu-yu, et al. 2023. Analysis of the variation in Burning Characteristics of Litters from Different Forest Types in Western Sichuan. Journal of Anhui Agricultural Sciences. 51 (24), 97-100.
- 宋林姝, 王峥, 刘燕, 高健洲 and 李秉玲. 2023 北京常见灌木燃烧特性及抗火性评价. 生态学杂志, 42 (05), 1056-1064.
- (SONG Linshu, NANG Zheng, LIU Yan, et al. 2023. Flammability characteristics and fire resistance of common landscape shrub species in Beijing. Chinese Journal of Ecology. 42 (05), 1056-1064.)
- 陈涤非, 王明玉, 司莉青, 赵凤君 and 舒立福. 2023 四川省生物防火隔离带树种选择. 陆地生态系统与保护学报, 3 (02), 56-68.
- (Chen Difei, Wang Mingyu, Si Liqing, et al. 2023. Study on Tree Species Selection of Biological Fire Barrier in Sichuan Province. Terrestrial Ecosystem and Conservation. 3 (02), 56-68.)
- 刘小燕, 叶林妹 and 赵雪康. 2023 浙南山区防火树种选择及育苗造林技术分析. 林业科技情报, 55 (02), 26-28.
- (Liu Xiaoyuan, Ye Linmei, Zhao Xuekang, et al. 2023. Selection of Fireproof Tree Species and Analysis of Seeding Cultivation and Afforestation Techniques in the Southern Zhejiang Mountain Area. Forestry Science and Technology Information. 55 (02), 26-28.)
- 王康锋 and 罗永忠. 2023 陇南市主要林型可燃物载量与环境因子的关系. 森林与环境学报, 43 (06), 651-658.
- (WANG Kangfeng, LUO Yongzhong, 2023. Relationship between the fuel load and environmental factors of the main forest types in Longnan City. Journal of Forest and Environment. 43 (06), 651-658.)
- 陈飞, 薛杨, 王小芳 and 王小燕. 2024 森林火灾现状及防火救火管理措施. 热带林业, 52 (02), 106-109+113.
- (Chen Fei, Xue Yang, Wang Xiaofang, et al. 2024. Status of Forest Fires and Fire Management Measures. Tropical Forestry. 52 (02), 106-109+113.)
- Grootemaat S, Wright I J, Van Bodegom P M, et al. Burn or rot: leaf traits explain why flammability and decomposability are decoupled across species [J]. Functional Ecology, 2015, 29(11): 1 486-1 497.