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

陇南市主要森林类型死可燃物特征及危险性评价

王康锋 罗永忠 逯真佳 马立鹏 张存焘 郭鹏 马婧 赵亮生

Characteristics and risk assessment of dead fuel in main forest types in Longnan City, Gansu Province of northwestern China

Wang Kangfeng, Luo Yongzhong, Lu Zhenjia, Ma Lipeng, Zhang Cuntao, Guo Peng, Ma Jing, Zhao Liangsheng

引用本文:
王康锋, 罗永忠, 逯真佳, 马立鹏, 张存焘, 郭鹏, 马婧, 赵亮生. 陇南市主要森林类型死可燃物特征及危险性评价[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8):132–138. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230305
Wang Kangfeng, Luo Yongzhong, Lu Zhenjia, Ma Lipeng, Zhang Cuntao, Guo Peng, Ma Jing, Zhao Liangsheng. Characteristics and risk assessment of dead fuel in main forest types in Longnan City, Gansu Province of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8):132–138. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230305

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230305

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于小班尺度的北京市密云区森林火灾危险性评价

Hazard assessment of forest fire in Miyun District of Beijing based on the subcompartment scale

北京林业大学学报, 2024, 46(2): 75–86. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230227

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

北京地区8种树种枯死可燃物含水率预测模型及变化规律

Prediction models and changing rules of dead fuel moisture content of 8 forest species in Beijing area

北京林业大学学报, 2020, 42(6): 80–90. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190370

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

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

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

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230305

陇南市主要森林类型死可燃物特征及危险性评价

王康锋[1] 罗永忠[1] 逯真佳[1] 马立鹏[2] 张存焘[2] 郭 鹏[2] 马 婧[2] 赵亮生[2]
（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省生态资源监测中心，甘肃 兰州 730030）

摘要:【目的】探究陇南市主要森林类型死可燃物特征，并对森林火灾危险性进行评估，为区域森林火灾预防提供理论支撑。**【方法】**以陇南市 4 种主要森林类型为研究对象，分析不同森林类型死可燃物载量、干鲜比、平衡含水率、燃点和热值差异，并采用隶属函数模糊评价法对不同森林类型火灾危险性进行评价。**【结果】**4 种森林类型死可燃物总载量呈油松林 > 落叶松林 > 栎类林 > 华山松林，且油松死可燃物总载量（16.02 t/hm^2）显著高于其他 3 种森林类型（$P < 0.05$），死可燃物中腐殖质和枯落物 1 载量显著高于枯落物 2 和枯落物 3（$P < 0.05$）。油松枯落物 1 死可燃物干鲜比显著高于落叶松（$P < 0.05$），枯落物 2 死可燃物干鲜比最高（58.21% ~ 66.47%），腐殖质最低（51.29% ~ 55.56%）。栎类死可燃物平衡含水率最大，落叶松最小；枯落物 3 死可燃物平衡含水率最高（16.78% ~ 20.38%），腐殖质层最低（12.22% ~ 13.86%）；死可燃物平衡含水率与可燃物直径成正比。腐殖质燃点显著高于枯落物，热值则与之相反（$P < 0.05$）。隶属函数模糊评价结果表明 4 种森林类型中油松火灾危险性最大，其次是栎类和落叶松，华山松最低。**【结论】**不同森林类型和组分死可燃物载量、干鲜比、平衡含水率、燃点和热值存在差异。油松可燃物总载量最高，燃点和平衡含水率最低，导致其火灾危险性最大，因此在陇南市森林的经营和林火预防工作中，应加强对油松林可燃物管理。

关键词：陇南市森林；死可燃物特征；危险性评价；隶属函数模糊评价
中图分类号：S762.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)08−0132−07
引文格式：王康锋，罗永忠，逯真佳，等. 陇南市主要森林类型死可燃物特征及危险性评价 [J]. 北京林业大学学报，2024，46(8)：132−138. Wang Kangfeng, Luo Yongzhong, Lu Zhenjia, et al. Characteristics and risk assessment of dead fuel in main forest types in Longnan City, Gansu Province of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8): 132−138.

Characteristics and risk assessment of dead fuel in main forest types in Longnan City, Gansu Province of northwestern China

Wang Kangfeng[1] Luo Yongzhong[1] Lu Zhenjia[1] Ma Lipeng[2] Zhang Cuntao[2]
Guo Peng[2] Ma Jing[2] Zhao Liangsheng[2]
(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Gansu Monitoring Center for Ecological Resources, Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: [**Objective**] This paper explored the characteristics of dead fuel in main forest types in Longnan City, Gansu Province of northwestern China, and assessed the risk of forest fires, to provid theoretical support for regional forest fire prevention. [**Method**] Taking four main forest types in Longnan City as the research objects, the paper analyzed the difference of dead fuel load, dry to fresh ratio, equilibrium moisture content, ignition point and calorific value, and evaluated the fire risk of different forest types by membership function fuzzy evaluation method. [**Result**] The total dead fuel load of different forest types was *Pinus tabuliformis* > *Larix gmelinii* > *Quercus* > *Pinus armandii*. The total dead fuel load of *Pinus tabuliformis* (16.02 t/ha) was significantly higher than others ($P < 0.05$), and the dead fuel load of humus layer and litter

收稿日期: 2023−11−03 **修回日期:** 2024−07−17
基金项目: 甘肃省生态资源监测中心省级林业草原资源保护与发展基金（701-03723041）。
第一作者: 王康锋。主要研究方向：森林生态研究。Email: 508813920@qq.com 地址：730070 甘肃省兰州市安宁区营门村 1 号甘肃农业大学林学院。
责任作者: 罗永忠，教授，博士生导师。主要研究方向：森林培育与水土保持研究。Email: luoyzhong@gsau.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

layer 1 was significantly higher than that of litter layer 2 and 3 ($P < 0.05$). The dry to fresh ratio of dead fuel in *Pinus tabuliformis* litter layer 1 was significantly higher than that of *Larix gmelinii* ($P < 0.05$). The dry to fresh ratio of dead fuel in litter layer 2 was the highest (58.21%−66.47%) and that in humus layer was the lowest (51.29%−55.56%). The equilibrium moisture content of dead fuel in oak was the largest, while that in larch was the smallest. The equilibrium moisture content of dead fuel in litter layer 3 was the highest (16.78%−20.38%), and that in humus layer was the lowest (12.22%−13.86%). The equilibrium moisture content of dead fuel was directly proportional to the diameter of fuel. The ignition point of humus layer was significantly higher than that of litter layer, while the calorific value was opposite ($P < 0.05$). The fuzzy evaluation results of membership function showed that the fire risk of *Pinus tabuliformis* stands was the largest, followed by *Quercus* sp. and *Larix gmelinii*, and that of *Pinus armandii* stands was the lowest. [**Conclusion**] There are differences in dead fuel load, dry to fresh ratiod, equilibrium moisture content, ignition point and calorific value among different forest types and components. *Pinus tabuliformis* forest has the highest load, the lowest ignition point and equilibrium moisture content, which leads to the highest fire risk. Therefore, in the forest management and forest fire prevention in Longnan City, the management of *Pinus tabuliformis* forest fuel should be strengthened.

Key words: forest in Longnan City; characteristics of dead fuel; risk assessment; fuzzy evaluation of membership function

林火作为一种生态系统调节因子，影响着森林生态系统的稳定、更新和演替。失控的森林火灾对森林生态系统平衡和人民财产安全造成重大影响[1]。森林可燃物作为森林燃烧的物质基础，是森林中所有可以燃烧的有机物质的集合，可燃物的长期积累使灾害性森林火灾的几率增加[2]。死可燃物作为森林可燃物的重要组成部分，是引发地表火从而导致森林火灾发生的主要原因。在可燃物的引燃过程中，除火源之外，可燃物本身理化特征也直接或间接地影响林火的发生[3]。森林可燃物的特征可分为内在特性和外在特征，其中内在特性包括可燃物燃点、热值等，外在特征包括载量、干鲜比、平衡含水率等[4]。其中载量、干鲜比、热值与可燃物燃烧性正相关，平衡含水率、燃点则与可燃物燃烧性负相关[5]。

20 世纪 60 年代，国外便出现了应用数学模型来阐述森林可燃物与林分因子之间关系的报道[6]，学者们运用不同类型的可燃物模型对森林火灾进行预报[7-8]。国内对森林可燃物的研究主要集中在可燃物自身特征、燃烧性和燃烧产生的环境效应以及基于可燃物特征的森林火险评价等。李建华等[9]通过对亚热带典型森林类型可燃物载量的分析，得到不同森林类型可燃物载量的分配特征差异；周翔等[10]在对新疆天山东部森林地表可燃物热值的研究中发现林型、树种以及理化性质等条件综合影响着可燃物的热值含量；宋巧娣[11]利用可燃物载量和燃烧特性通过层次分析法对泰山地区森林火险进行区划。

近年来，由于全球气候日趋变暖和人为因素的影响，森林火灾的出现频率逐年上升[12]。根据第一次全国自然灾害综合风险普查结果显示，20 世纪 90 年代至今，甘肃省发生森林火灾 344 次，其中 20% 发生在森林覆盖率最高的陇南市。近些年，随着防火工作的加强，陇南市的森林火灾发生次数和过火面积得到了有效遏制，致使一些未遭受林火干扰林分的可燃物大量积累。本研究通过调查分析陇南市华山松（*Pinus armandii*）、栎类（*Quercus*）、落叶松（*Larix gmelinii*）和油松（*Pinus tabuliformis*）林的死可燃物特征，采用隶属函数模糊评价法对不同森林类型火灾危险性进行评价，为该市森林经营与林火预防工作提供科学依据。

1　研究区域概况

陇南市（32°35′45″ ~ 34°32′00″N，104°01′19″ ~ 106°35′20″E），属于温带季风性湿润气候，年均温 14.7 ℃，年降水量 600 ~ 1 000 mm。地貌以山地和丘陵为主，平均海拔为 1 000 ~ 1 500 m。区域森林资源丰富，主要植被类型有华山松、油松等针叶林，黄连木（*Pistacia chinensis*）、紫椴（*Tilia amurensis*）等阔叶树，以及竹林等[13]。

2　研究方法

2.1　样地设置与调查

依据陇南市森林与草原自然灾害风险普查结果，选取油松林、落叶松林、栎类林和华山松林 4 种乔木标准样地进行数据调查（图 1、表 1）。于 2022 年 06 月—07 月在标准地四角设置 1 m × 1 m 的样方，采用收获法调查不同组分死可燃物信息，使用电子称对样方内不同死可燃物样品进行称量，记录其鲜质量。将 4 个样方中相同类型可燃物混合后分别

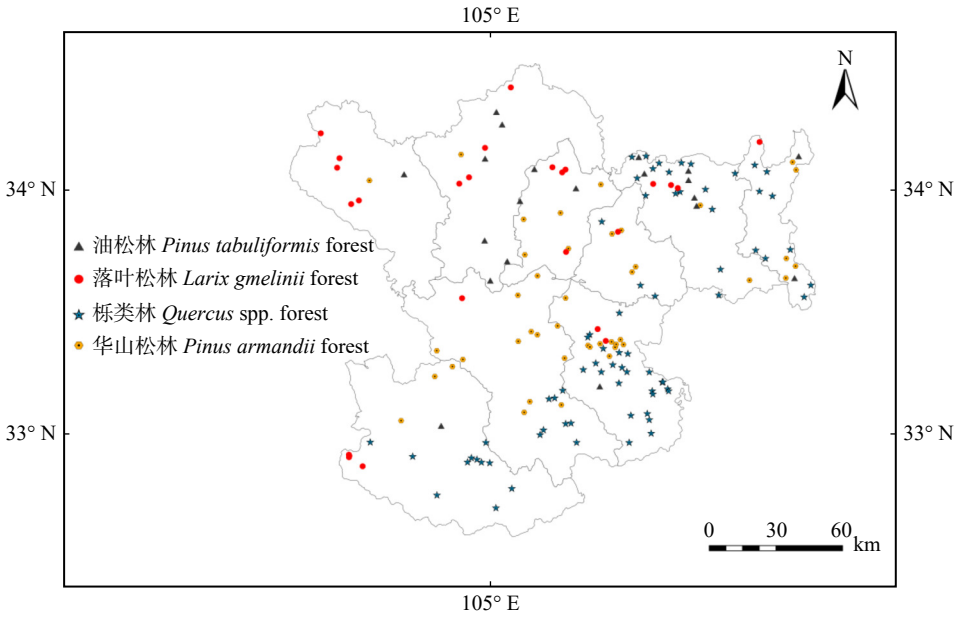


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

指标 Index	华山松林 *Pinus armandii* forest	栎类林 *Quercus* sp. forest	落叶松林 *Larix gmelinii* forest	油松林 *Pinus tabuliformis* forest
海拔 Elevation/m	1 269 ~ 2 446	968 ~ 2 078	720 ~ 1 837	992 ~ 2 256
郁闭度 Canopy density	0.20 ~ 0.75	0.20 ~ 0.69	0.39 ~ 0.80	0.32 ~ 0.80
林分密度/(株·hm^{-2}) Stand density/(tree·ha^{-1})	270 ~ 3 165	480 ~ 3 735	550 ~ 3 405	825 ~ 3 495
平均树高 Average tree height/m	11.84 ± 3.71	9.34 ± 2.06	10.50 ± 2.62	8.38 ± 2.27
平均胸径 Mean DBH/cm	12.06 ± 2.01	12.53 ± 3.11	13.61 ± 4.70	12.43 ± 2.71
坡度 Slope	缓坡、斜坡、陡坡 Gentle slope, slope, steep slope	斜坡、陡坡、急坡 Slope, steep slope, sharp slope	缓坡、斜坡、陡坡、急坡 Gentle slope, slope, steep slope, sharp slope	平坡、缓坡、斜坡、陡坡、急坡 Flat slope, gentle slope, slope, steep slope, sharp slope
坡向 Aspect	东坡、西坡、东南坡、南坡、西南坡 East slope, west slope, southeast slope, south slope, southwest slope	西北坡、东坡、西坡、南坡、东南坡、西南坡 Northwest slope, east slope, west slope, south slope, southeast slope, southwest slope	西北坡、东坡、西坡、东南坡 Northwest slope, east slope, west slope, southeast slope	西坡、东南坡、西南坡、南坡 West slope, southeast slope, southwest slope, south slope
坡位 Slope position	山谷、下坡、中坡 Valley, downhill, mid-slope	山谷、下坡 Valley, downhill	山谷、下坡、中坡 Valley, downhill, mid-slope	山谷、下坡 Valley, downhill
龄组 Age group	幼龄林、中龄林、近熟林 Young forest, middle-aged forest, near-mature forest	幼龄林、中龄林 Young forest, middle-aged forest	幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林 Young forest, middle-aged forest, near-mature forest, mature forest	幼龄林、中龄林、近熟林 Young forest, middle-aged forest, near-mature forest

取样 200 g 放入样品袋中，贴上标签以便后续的分析和使用[14]。

依据可燃物分类方法可将死可燃物分为腐殖质和枯落物，其中枯落物按照直径(d)大小分为枯落物 1(d < 0.6 cm)、枯落物 2(0.6 cm≤ d < 2.5 cm)、枯落物 3(2.5 cm ≤ d < 7.6 cm)[15]。

2.2 死可燃物指标测定

干鲜比和载量计算。将外业调查所采样品，在 80 ℃ 的鼓风干燥箱内烘干至恒质量，称其质量。

$$R_{DF} = \frac{m_d}{m_f} \times 100\% \tag{1}$$

$$M_d = R_{DF} \times M_f \tag{2}$$

$$F = \frac{M_t}{Q \times A} \tag{3}$$

式中：R_{DF} 为干鲜比，m_d 为样品干质量，m_f 为样品鲜质量，M_d 为样方总干质量，M_f 为样方总鲜质量，

F 为可燃物载量，M_t 为标准地所有样方总干质量，Q 为样方数量，A 为样方面积。

可燃物平衡含水率的测定。将烘干后的枯落物、腐殖质样品浸泡于水中，持续 24 h 直至样品饱和，浸泡后的样品从水中取出，在空气中放置 10 min 以去除样品表面水分。用电子天平称量样品，记录每个样品的浸水饱和质量（湿质量），在测定样品的平衡含水率时，将已经浸水饱和的样品放入特制的塑料筐中（四周和底部都设计有网孔，以确保空气能够流通，从而加速样品的干燥过程），并提前对塑料筐进行称量，然后将塑料筐放入恒温恒湿的培养箱内，其温度和湿度分别为 25 ℃ 和 30%，每两小时测量并记录一次塑料筐的质量，直到连续两次测量计算得到含水率差值小于 1%，此时可燃物的含水率基本达到了平衡含水率，停止试验[16]。

$$M_E = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中：M_E 为平衡含水率，m_1 为样品的初始质量，m_2 为达到平衡时的样品质量。

可燃物燃点和热值的测定。取烘干后的可燃物，去掉表面灰尘，用植物粉碎机粉碎可燃物样品，使用温度测定仪测定可燃物样品的燃点，每个样品测 3 ~ 5 次，测定值误差按照《森林可燃物》（LY/T 2013）的测定标准执行。取粉碎后的可燃物样品 1 g 放入 CA-3 型燃烧量热计内筒中进行充分燃烧，测量其燃烧热值，每个样品测定 3 ~ 5 次，测定值误差按照《森林可燃物》（LY/T 2013）的测定标准执行。

2.3　森林火灾危险性评价

采用隶属函数模糊评价法对不同森林类型的火灾危险性进行综合评价。利用式（5）计算与火灾危险性呈正相关指标的隶属函数值；利用式（6）计算与火灾风险呈负相关指标的隶属函数值；通过式（7）计算隶属函数值的总和（D_j），并对其进行排序[17]。

$$\mu(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

$$\mu(X_i) = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^{n} \mu(X_i) \quad (7)$$

式中：X_i 为指标 i 测定值，$X_{\min}$ 为指标 i 的最小值，$X_{\max}$ 为指标 i 的最大值，j 为森林类型，n 指标个数。

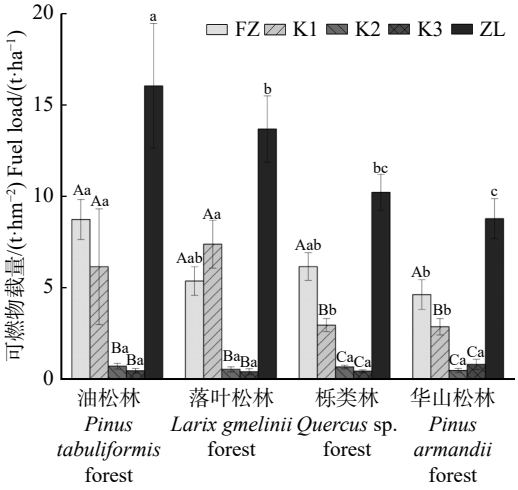
2.4　数据处理与分析

用 Microsoft excel 2021 对测得的各指标数据进行整理，使用 SPSS 26.0 对不同森林类型死可燃物各指标进行方差分析，Duncan 检验比较参数间的差异（$P < 0.05$），Origin 2022 作图。

3　结果与分析

3.1　不同森林类型死可燃物载量特征

不同森林类型死可燃物总载量呈油松林 > 落叶松林 > 栎类林 > 华山松林，4 种森林类型不同组分死可燃物中腐殖质和枯落物 1 的载量显著高于枯落物 2 和枯落物 3（$P < 0.05$）。同一组分不同森林类型可燃物载量中，油松林腐殖质载量最高（8.72 t/hm^2），与华山松林腐殖质载量差异显著（$P < 0.05$）；落叶松林枯落物 1 可燃物载量最高（7.37 t/hm^2）显著高于栎类林和华山松林（$P < 0.05$）（图 2）。



FZ.腐殖质；K1.枯落物 1；K2.枯落物 2；K3.枯落物 3；ZL.总载量。不同大写字母表示同一森林类型不同组分可燃物存在显著差异（$P < 0.05$），不同小写字母表示同一组分不同森林类型可燃物存在显著差异（$P < 0.05$）。下同。FZ, humus; K1, litter 1; K2, litter 2; K3, litter 3; ZL, total load. Different capital letters indicate that there are significant differences among varied combustible components ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate that there are significant differences among varied forest types ($P < 0.05$). The same below.

图 2　不同森林类型各组分死可燃物载量

Fig. 2　Dead fuel load of various components in different forest types

3.2　不同森林类型死可燃物干鲜比特征

同一森林类型不同组分可燃物干鲜比中，枯落物 2 干鲜比最高（58.21% ~ 66.47%），腐殖质干鲜比最低（51.29% ~ 55.56%），且 4 种森林类型中枯落物 2 干鲜比均显著高于腐殖质（$P < 0.05$）。同一组分不同森林类型可燃物干鲜比中，油松林枯落物 1 干鲜比（60.29%）最高，落叶松林最低（51.56%），二者差异显著（$P < 0.05$）（图 3）。

3.3　不同森林类型死可燃物平衡含水率特征

同一森林类型不同组分死可燃物平衡含水率中，枯落物 3 最高（16.78% ~ 20.38%），腐殖质最低（12.22% ~ 13.86%）。栎类林的枯落物 3（20.38%）和枯落物 2（19.80%）可燃物平衡含水率显著高于腐殖质（13.86%）和枯落物 1（15.54%）（$P < 0.05$）。同一组

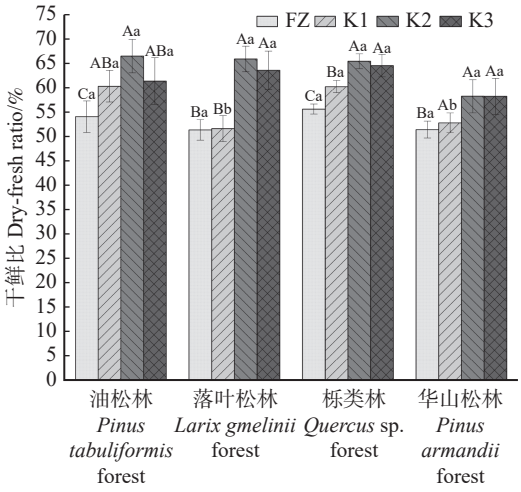


图 3 不同森林类型各组分死可燃物干鲜比

Fig. 3 Dry-fresh ratio of dead fuel in different forest types

分不同森林类型可燃物平衡含水率中，华山松林的枯落物 1 最高(16.66%)，栎类林的腐殖质和枯落物 2、3 最高，与其他林分无显著差异。总体来看同一森林类型不同组分死可燃物平衡含水率呈枯落物 3 > 枯落物 2 > 枯落物 1 > 腐殖质，即随着可燃物直径增大，平衡含水率也有不同程度的升高(图 4)。

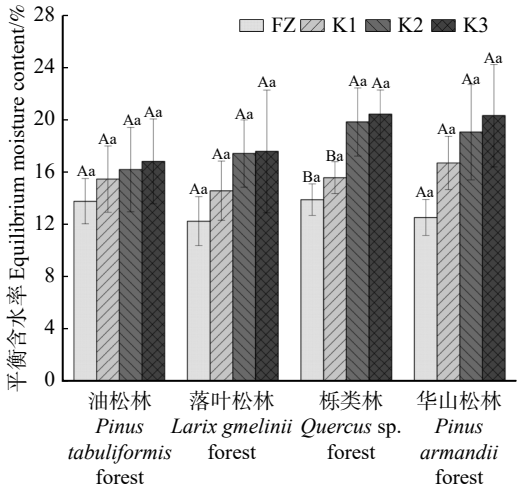


图 4 不同森林类型各组分死可燃物平衡含水率

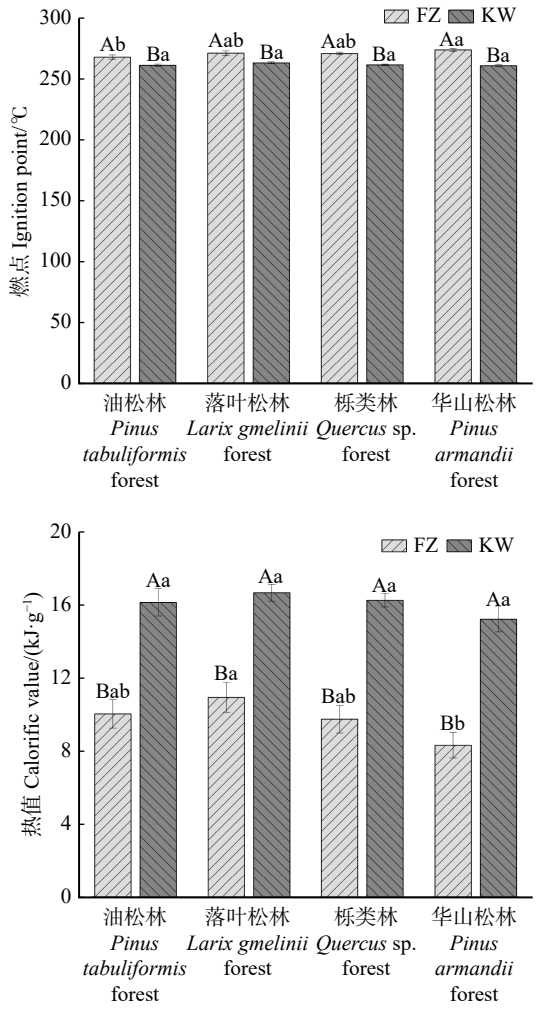
Fig. 4 Equilibrium moisture content of dead fuel in different forest types

3.4 不同森林类型死可燃物燃点及热值差异

同一森林类型腐殖质燃点显著高于枯落物($P < 0.05$)。华山松林腐殖质燃点最高(273.60 ℃)，油松林最低(267.69 ℃)，二者差异显著($P < 0.05$)。同一森林类型枯落物热值显著高于腐殖质层($P < 0.05$)。落叶松林的腐殖质热值最高(10.90 kJ/g)，华山松林最低(8.29 kJ/g)，两者差异显著($P < 0.05$)。从整体来看，同一森林类型不同组分可燃物燃点和热值呈反比关系，即可燃物燃点越高热值越低(图 5)。

3.5 不同森林类型火灾危险性评价

隶属函数综合评价值是干鲜比、载量、平衡含水



KW.枯落物(枯落物 1 和枯落物 2 混合物)。KW, litter (mixture of litter 1 and litter 2).

图 5 不同森林类型各组分死可燃物燃点和热值

Fig. 5 Ignition point and calorific value of dead fuel in different forest types

率、燃点和热值 5 个指标隶属函数值的总和，综合评价值越大，说明该森林类型火灾危险性越高。其中油松林隶属函数值为 3.70，落叶松林为 2.61，栎类林为 2.88，华山松林为 1.22。根据综合评价值对各森林类型火灾危险性排序，结果为油松林 > 栎类林 > 落叶松林 > 华山松林(表 2)。

4 讨 论

森林可燃物是森林火灾发生的物质基础，不同的易燃物质影响着火灾的行为特征。死可燃物作为森林可燃物的重要组成部分，是森林火灾形成过程中最容易着火并快速燃烧的物质[18]。

研究结果表明不同森林类型死可燃物总载量呈油松林 > 落叶松林 > 栎类林 > 华山松林，且油松林死可燃物总载量(16.02 t/hm^2)显著高于其他 3 种森林类型。于海晨等[19]对北京地区典型针叶林地表可燃物载量的研究中发现油松林可燃物载量显著高于

表 2　不同森林类型火灾危险性综合评价

Tab. 2　Comprehensive evaluation of fire risk of different forest types

森林类型 Forest type	干鲜比 Dry to fresh ratio	燃点 Ignition point	热值 Calorific value	可燃物载量 Fuel load	平衡含水率 Equilibrium moisture content	综合评价 Comprehensive evaluation	排序 Sort
油松林 *Pinus tabuliformis* forest	0.78	0.91	0.65	0.72	0.64	3.70	1
落叶松林 *Larix gmelinii* forest	0.44	0.23	1.00	0.36	0.58	2.61	3
栎类林 *Quercus* sp. forest	0.96	0.60	0.63	0.33	0.36	2.88	2
华山松林 *Pinus armandii* forest	0.04	0.50	0.02	0.25	0.41	1.22	4

侧柏(*Platycladus orientalis*)林，李炳怡等[20]认为北京市门头沟刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)、油松林、侧柏林中油松林死可燃物载量最高。油松是针叶树种，死可燃物中还包括球果，且松针角质层发达不易分解[21]，导致其可燃物载量大；研究中所选样地郁闭度小，多分布于向阳地段，导致林下草本灌木生长旺盛，死可燃物大量积累。从可燃物的构成来看，腐殖质和枯落物 1 为死可燃物的主要组成部分，二者均显著高于其他组分可燃物载量。赵璇等[22]认为下层枯落物(枯叶、腐殖质)载量在林下可燃物载量中占比最大，可能是由于所调查的林分平均树高较高，林分密度小，种内竞争小，林木生长过程中养分充足，导致枯枝落叶和有机物大量积累。本研究中 4 种森林类型生长地区海拔高且跨度大，有研究表明在高海拔地区，低温和湿润的气候更有利于土壤腐殖质的生成[23]。同一森林类型不同组分平衡含水率随可燃物直径的增大而增大，这是由于枯落物 1 大多由直径小于 0.6 cm 的树叶组成，而枯落物 2 和枯落物 3 主要由树枝组成，两者相较而言，树叶的表面积大，吸水能力较弱，失水速度快，造成其平衡含水率小[5,16]。不同森林类型腐殖质热值显著低于枯落物层，燃点则与之相反($P < 0.05$)。这由于枯落物(枯落物 1、2 混合物)中主要为落叶、杂草和直径小于 2.5 cm 的枯枝，其内部含有树脂等高能化合物[24]。周翔等[10]对新疆天山东部森林地表可燃物的热值研究中发现，同一森林类型不同组分间枯落物热值大于腐殖质。

森林火灾危险性是指森林火灾致灾因子的不同强度及其出现的可能性。可燃物作为林火发生的主要驱动因子，其载量、燃点、热值、干鲜比和平衡含水率等直接影响森林火灾的发生及火势的蔓延[25−26]。本文利用隶属函数模糊评价法，对 4 种森林类型火灾危险性进行初步探究和综合评价，结果显示油松林火灾危险性最高，其次是栎类林和落叶松林，华山松林火灾危险性最低。评价指标中油松林可燃物载量、燃点高于其他森林类型，平衡含水率在 4 种森林类型中最低，导致其森林火灾危险性最高。

5　结　　论

本文以不同森林类型死可燃物载量、干鲜比、平衡含水率、燃点和热值为切入点，综合评价不同森林类型火灾发生的危险性。不同森林类型死可燃物载量呈油松林 > 落叶松林 > 栎类林 > 华山松林。随着可燃物直径的增大，其平衡含水率也有不同程度的升高。同一森林类型腐殖质燃点显著高于枯落物，热值则与之相反($P < 0.05$)。

本研究结果有助于有针对性地加大不同森林类型火灾的预防和对防火基础设施建设的投入。当然造成森林火灾发生的因子还包括气象条件、野外火源、地形地势等。文中对森林火灾危险性的评价运用了 5 种可燃物实测指标，后续研究中可加入其他致灾因子，采用不同评价方法进行危险性评价，如聚类分析法、逻辑斯谛回归、森林火险指数评价法等。

参　考　文　献

[1] Zhu Z, Deng X F, Zhao F, et al. How environmental factors affect forest fire occurrence in Yunnan forest region[J/OL]. Forests, 2022, 13(9): 1392[2023−10−20]. https://doi.org/10.3390/f13091392.

[2] 贺涵, 常禹, 刘志华, 等. 不同火控制政策下森林可燃物处理对大兴安岭林火情势的影响 [J]. 生态学杂志, 2024, 43(2): 305−313.
He H, Chang Y, Liu Z H, et al. Effects of fuel treatments on the forest fire regimes under different fire control policies in the Great Xing'an Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(2): 305−313.

[3] Flannigan M D, Stocks B J, Wotton B M. Climate change and forest fires[J]. Science of the Total Environment, 2000, 262(3): 221−229.

[4] 高亚东. 塞罕坝保护区主要优势树种林分地表可燃物特征及火险等级的研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2023.
Gao Y D. Study on the charactteristics of surface fuel and fire risk grades of main dominant tree species in Saihanba Nature Reeserve[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023.

[5] 付志高, 王志龙, 肖以华, 等. 粤北地区典型人工林林下森林可燃物的特征研究 [J]. 林业资源管理, 2022(4): 61−71.
Fu Z G, Wang Z L, Xiao Y H, et al. Characteristics of understory forest fuels in typical plantations in northern Guangdong Province[J]. Forest Resources Management, 2022(4): 61−71.

[6] Cruz G M, Alexander M E, Dam J E. Using modeled surface and crown fire behavior characteristics to evaluate fuel treatment

effectiveness: a caution[J]. Forest Science, 2014, 60(5): 1000−1004.

[7] Baranovskiy V N, Kirienko A V. Mathematical simulation of forest fuel pyrolysis and crown forest fire impact for forest fire danger and risk assessment[J]. Processes, 2022, 10(3): 483.

[8] Lee H T, Won M, Yoon S, et al. Estimation of 10-hour fuel moisture content using meteorological data: a model inter-comparison study[J/OL]. Forests, 2020, 11(9): 982[2023−12−20]. https://doi.org/10.3390/f11090982.

[9] 李建华, 夏虹露, 唐卫平, 等. 亚热带典型森林类型可燃物载量分配特征 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 47(5): 57−64.
Li J H, Xia H L, Tang W P, et al. Characteristics of fuel load distribution in typical subtropical forest types[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(5): 57−64.

[10] 周翔, 王鹏, 布玛丽亚穆·麦麦提, 等. 新疆天山东部森林地表可燃物的热值研究 [J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1670−1677.
Zhou X, Wang P, Bumaliyamu Mainaiti, et al. Calorific values of forest surface fuels in the eastern Tianshan Mountains of Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1670−1677.

[11] 宋巧娣. 泰山森林可燃物分布及火险等级的划分 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
Song Q D. Distribution of forest fuel and classification of fire risk in Mount Taishan[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.

[12] Mina U, Dimri A P, Farswan S. Forest fires and climate attributes interact in central Himalayas: an overview and assessment[J]. Fire Ecology, 2023, 19(1): 1−18.

[13] 李晓兵. 甘肃陇南市生态文明建设及方案研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
Li X B. Study of Gansu ecologiccal civilization construction and solutions in Longnan City[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.

[14] 杨雪清, 孙志超, 柴政, 等. 全国森林可燃物载量样地调查与预估方法探讨 [J]. 林业资源管理, 2022(6): 1−6.
Yang X Q, Sun Z C, Chai Z, et al. Research on the plot survey and load estimation of national forest fuels[J]. Forest Resources Management, 2022(6): 1−6.

[15] 杨清雪, 孙志超, 徐泽鸿, 等. 森林可燃物标准地调查技术规程 [Z]. 北京: 国家林业和草原局, 2021.
Yang Q X, Sun Z C, Xu Z H, et al. Technical specification for investigation of forest combustible standard[Z]. Beijing: National Forestry and Graassland Administration, 2021.

[16] 韩岳宏, 王月, 高国平. 5 种林型地表细小可燃物组成对平衡含水率和时滞的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(11): 62−65.
Han Y H, Wang Y, Gao G P. Fine fuels, equilibrium moisture content, and time-lag of several forest types[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(11): 62−65.

[17] 王园园, 赵明, 张红香, 等. 干旱胁迫对紫花苜蓿幼苗形态和生理特征的影响 [J]. 中国草地学报, 2021, 43(9): 78−87.
Wang Y Y, Zhao M, Zhang H X, et al. Effects of drought stress on morphological and physiological characteristics of alfalfa seedlings[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(9): 78−87.

[18] 满子源, 孙龙, 胡海清, 等. 南方 8 种森林地表死可燃物在平地无风时的燃烧蔓延速率与预测模型 [J]. 林业科学, 2019, 55(7): 197−204.
Man Z Y, Sun L, Hu H Q, et al. Prediction model of the spread rate of eight typical surface dead fuel in southern China under windless and flat land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 197−204.

[19] 于海晨, 王薇, 杜建华, 等. 油松和侧柏林地表可燃物负荷量及影响因素 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 33−40.
Yu H C, Wang W, Du J H, et al. Land surface fuel load and influencing factors of *Pinus tabuliformis* and *Platycladus orientalis* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 33−40.

[20] 李炳怡, 刘冠宏, 舒立福. 北京门头沟区主要林分类型地表火行为模拟研究 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(6): 96−105.
Li B Y, Liu G H, Shu L F. Simulation study on surface fire behavior of main forest types in Mentougou District, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(6): 96−105.

[21] 巫清芸, 吴志伟, Keane R E, 等. 赣南地区森林地表死可燃物载量与环境因子的关系 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1539−1546.
Wu Q Y, Wu Z W, Keane R E, et al. Relationship between surface dead fuel loadings and environmental factors in southern Jiangxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1539−1546.

[22] 赵璇, 游玮, 晁志, 等. 秦岭东段不同密度油松飞播林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.
Zhao X, You W, Chao Z, et al. Surface fuel loads and influencing factors on aerial seeding *Pinus tabuliformis* forests with different densities in the eastern Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 159−165.

[23] 周红, 何欢, 肖蒙, 等. 云南省森林土壤腐殖质组分特征及影响因素 [J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 1008−1017.
Zhou H, He H, Xiao M, et al. Composition of humus in forest soils of Yunnan Province, China and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 1008−1017.

[24] 李颖, 严思晓, 张秀芳, 等. 武夷山国家公园内 4 种森林类型地表可燃物热值特征比较 [J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1385−1391.
Li Y, Yan S X, Zhang X F, et al. Comparison of surface fuel calorific value characteristics of four forest types in Wuyishan National Park[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(6): 1385−1391.

[25] 王婕, 牛树奎, 陈锋. 滇中地表死可燃物平衡含水率和时滞与温湿度的关系研究 [J]. 生态科学, 2019, 38(1): 26−32.
Wang J, Niu S K, Chen F. The relationship between equilibrium moisture content, time-lag of dead fuel and temperature and humidity in central Yunnan[J]. Ecological Science, 2019, 38(1): 26−32.

[26] 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, Nuerguli, 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.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 臧润国）