·森林资源建设与保护 Construction and Protection of Forest Resources·

广西不同林型可燃物含水率与环境因子的关系

韦龙斌，李枫*，彭泊林，巨文珍，李常诚，何珊，马一琳
（广西壮族自治区林业勘测设计院，南宁 530011）

摘　要：为探究广西不同类型森林地表死可燃物含水率的差异特征，揭示关键环境影响因子，以广西4种典型森林类型（马尾松林、杉木林、桉树林、阔叶林）为研究对象，在重点防火期内采集并测定地表死可燃物绝对含水率，运用多重比较分析不同林型及不同类型死可燃物含水率差异，采用冗余分析（redundancy analysis，RDA）探讨地形因子和林分因子对死可燃物含水率的影响。结果表明，不同森林类型地表死可燃物绝对含水率存在显著差异，总体由大到小表现为阔叶林、杉木林、马尾松林、桉树林。同一林分内，粗大死可燃物与腐殖质的含水率显著高于细小死可燃物。海拔是影响地表死可燃物含水率最主要的地形因子，其次为坡向。林分密度和郁闭度是影响杉木、马尾松和桉树地表死可燃物最主要的林分因子，阔叶林受多个林分因子的共同影响，效应相对分散。在重点防火期内，应针对含水率较低的林型加强火险监测，结合地形和林分特征制定差异化的可燃物管理措施。

关键词：地表死可燃物；绝对含水率；冗余分析；环境因子；杉木；马尾松；桉树；阔叶林；广西
中图分类号：S757　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.007

Characteristics of Fuel Moisture Content in Different Forest Types and Its Relationship with Environmental Factors in Guangxi

WEI Longbin, LI Feng*, PENG Bolin, JU Wenzhen, LI Changcheng, HE Shan, MA Yilin
(Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Survey and Design Institute, Nanning 530011, China)

Abstract: To clarify the differences in the surface dead fuel moisture content among different forest types in Guangxi and to identify the key environmental factors affecting these variations, four typical forest types in Guangxi (*Pinus massoniana* forest, *Cunninghamia lanceolata* forest, *Eucalyptus* forest and broadleaved forest) were selected as research subjects. During the peak fire prevention period, surface dead fuel samples were collected and their absolute moisture content was measured. Multiple comparison analysis was conducted to examine the differences in moisture content among various forest types and dead fuels. Redundancy analysis (RDA) was used to explore the effects of topographic factors and stand structural factors on dead fuel moisture content. The results indicated that the absolute moisture content of surface dead fuels varied significantly among different forest types, generally in the order of broadleaved forest, *Cunninghamia lanceolata* fores, *Pinus massoniana* forest and *Eucalyptus* forest. Within each forest type, coarse dead fuels and humus showed significantly higher moisture content than fine dead fuels. Elevation was found to be the most influential topographic factor affecting surface dead fuel moisture content, fo llowed by slope aspect. Stand density and canopy density were the most important stand factors influencing the dead fuel moisture content in *Cunninghamia lanceolata*, *Pinus massoniana*, and *Eucalyptus* forests. In broadleaved forests, multiple stand factors influenced the moisture content, but their effects were more dispersed. During the peak fire prevention period, fire risk monitoring should focus on forest types with lower moisture content, and differentiated fuel management measures should be developed based on topographic and stand characteristics.

Keywords: Surface dead fuel; absolute moisture content; redundancy analysis; environmental factors; *Pinus massoniana*; *Cunninghamia lanceolata*; *Eucalyptus*; broadleaved forest; Guangxi

收稿日期：2026-03-17
基金项目：广西自筹经费林业科技项目(2023GXZCLK69)；广西林业设计院自选科技项目(林勘科研[2024]-04)。
第一作者简介：韦龙斌，硕士，高级工程师。研究方向为森林防火。E-mail：271687731@qq.com
***通信作者：**李枫，学士，高级工程师。研究方向为森林防火。E-mail：23659090@qq.com
引文格式：韦龙斌，李枫，彭泊林，等. 广西不同林型可燃物含水率与环境因子的关系[J]. 森林工程，2026，42(5)：954-962.
Wei Longbin, Li Feng, Peng Bolin, et al. Characteristics of Fuel moisture content in different forest types and its relationship with environmental factors in Guangxi[J]. Forest Engineering, 2026, 42(5): 954-962.

0　引言

森林火灾是威胁森林生态安全最主要的自然灾害之一，森林可燃物是林火三要素之一，是森林燃烧的物质基础[1-2]。森林可燃物的含水率直接影响林火发生的难易程度、林火强度和蔓延速度[3-5]，是火险发生和火行为预报的重要参考指标，对制定科学的森林火灾防控策略至关重要[6-7]。

可燃物含水率的研究始终是可燃物及林火管理的重点之一，自20世纪中叶起，美国、加拿大等国家率先开展了系统性的可燃物含水率研究，逐步构建了以时滞-平衡含水率理论为核心的火险等级预报体系[8-9]，我国相关研究始于20世纪80年代，特别是1987年大兴安岭“5·6”大火后，相关学者认识到可燃物含水率在林火预测预报中的重要性[10-12]，近年来随着研究不断深入，研究范围也从东北大小兴安岭、长白山等北方重点林区逐步扩展至全国[13-15]。森林可燃物含水率是植被与环境因子共同作用的结果，大量研究表明，地表可燃物含水率受温度、湿度和风速等气象因子的直接驱动，同时与海拔、坡向、坡度和林分结构（郁闭度、林龄）等环境因子密切相关[16-18]。

广西是我国南方重要的集体林区，集体林地面积占比达九成。相较于国有林地，集体林区在防火基础设施和专业化管理方面差距明显，且林地权属分散、人为活动频繁，火源管控难度更大。在全球气候变化趋势下，近年来广西极端天气频发，加之林草环城、林城镶嵌的现象普遍，森林防火形势愈发严峻。探究可燃物含水率与环境因子的关系，有助于揭示地表可燃物含水率的差异及空间分异规律，为区域火险评估和可燃物管理提供科学依据。但当前针对广西地区森林可燃物的研究尚不多见，尤其缺乏对不同林型地表可燃物含水率差异及与环境因子关系的系统分析。本研究以广西典型森林类型林分为研究对象，比对分析不同类型森林死可燃物含水率差异及与环境因子关系，为地区森林火险预警、可燃物管理及林火行为模拟提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

广西壮族自治区（104°28′~112°04′N，20°54′~26°23′E）西靠云贵高原，北为南岭山地，南临热带海洋，地势自西北向东南倾斜。全区为典型的亚热带季风气候，雨热同期，年均气温在17~24 ℃，年降雨量750~2 200 mm。植被类型主要有沟谷雨林、季雨林、常绿阔叶林、常绿落叶混交林、落叶阔叶林和针阔混交林等，人工植被主要有杉木（*Cunninghamia lanceolata*）、马尾松（*Pinus massoniana*）和速生桉（*Eucalyptus robusta*）等[19]。

1.2　样地设置与样品采集

本研究基于森林火灾风险普查，根据《森林可燃物标准地调查技术规程》（第一次全国自然灾害综合风险普查技术规范，FXPC/LC F-01），采用分层抽样方法，以森林起源、龄组、郁闭度、优势树种为指标，对全区森林小班进行抽样，取样时间为广西重点防火期（每年9月至次年4月）的10月至次年1月。本次选取了1 120个乔木样地，其信息见《森林工程》网站电子附件，标准样地大小为25.82 m×25.82 m，记录每个样地的海拔、坡度、坡向、坡位、起源、龄组、林分密度和平均胸径等基本信息。样地内，在距标准地每个角顶点两边3 m处设置2 m×2 m的灌木样方，草本层、枯落物和腐殖质可燃物样方在灌木样方靠近样地边界的位置，大小为1 m×1 m，见图1，图中1、2、3、4为4个灌木、草本、枯落物和腐殖质样方。

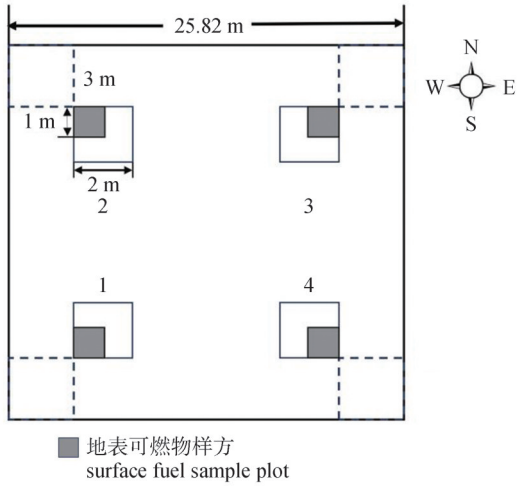


图1　取样示意图

Fig. 1　Schematic of plot layout

同一标准地内4个样方采用完全收获法获取每个样方内的所有腐殖质和枯落物，腐殖质样本在剔除腐殖质中石砾、土块和明显的树根等非腐殖质后，将所有样方样品混合后取200 g。枯落物样本是全部收集每个样方内枯枝、叶、果、枯草和半分解部分等枯死混合物后，剔除其中石砾、土块等非有机物质，将枯落物分为1 h时滞可燃物（以下简称为枯1 h，指直径<0.6 cm的小枝、叶和杂草）、10 h时滞可燃物（以下简称为枯10 h，指≥0.6 cm，但<2.5 cm的小枝），100 h时滞可燃物（以下简称为枯100 h，指≥2.5 cm，但<7.62 cm的枝条）共3类，各取200 g。本次共获取试验测定样本2 845份。样地基本情况见表1。

表1 样地基本概况

Tab. 1 Basic feature of the sampling plots

森林类型 forest type	样本数 number of sample	海拔/m elevation			郁闭度 canopy density			平均胸径(DBH)/cm average DBH			林分密度/(棵·hm^{-2}) stand densit		
		极小值 minimum	极大值 maximum	平均值 average	极小值 minimum	极大值 maximum	平均值 average	极小值 minimum	极大值 maximum	平均值 average	极小值 minimum	极大值 maximum	平均值 average
杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest	308	63	871	469	0.35	0.85	0.68	6.5	23.7	14.1	645	3 555	1 996
马尾松林 *Pinus massoniana* forest	562	6	875	250	0.35	0.85	0.63	9.6	25.2	17.2	330	3 000	1 453
桉树林 *Eucalyptus* forest	1 021	3	556	179	0.35	0.85	0.55	5.2	22.1	12.7	510	3 345	1 881
阔叶林 broadleaved forest	954	15	863	454	0.35	0.85	0.64	7.1	25.4	15.2	180	3 450	1 575

1.3 研究方法

1.3.1 含水率测定与计算

测量样品绝对含水率。采用烘干恒重法，将从野外采集的样品放入80 ℃的烘箱内连续烘干至恒重，称量死可燃物样品的绝干质量，计算出不同种类死可燃物的绝对含水率。计算公式为

$$A_{MC} = \frac{m_h - m_d}{m_d} \times 100\%。 \quad (1)$$

式中：A_{MC}为绝对含水率，%；m_h为样品自然状态下采集的可燃物样品湿质量，g；m_d为测定样品的绝对干质量，g。

1.3.2 数据处理与分析方法

采用最小显著差数法(least significant difference，LSD)对不同林型各类型死可燃物进行多重比较(α=0.05)，采用线性模型冗余分析(redundancy analysis，RDA)排序方法，分析死可燃物含水率与环境因子的关系，其中，海拔、坡度，坡向、坡位、林龄、郁闭度、林分平均胸径、林分密度为环境变量，用红色箭头线表示，腐殖质、枯1 h、枯10 h、枯100 h的绝对含水率为响应变量，用黑色箭头线表示，箭头连线的长短表示环境因子与含水率之间相关性的大小，箭头连线越长相关性越大，反之则越小；箭头所处的象限表明环境因子与排序轴之间相关性的正负；箭头连线与排序轴的斜率表示环境因子与排序轴的相关性，斜率越小相关性越高[16-17]。

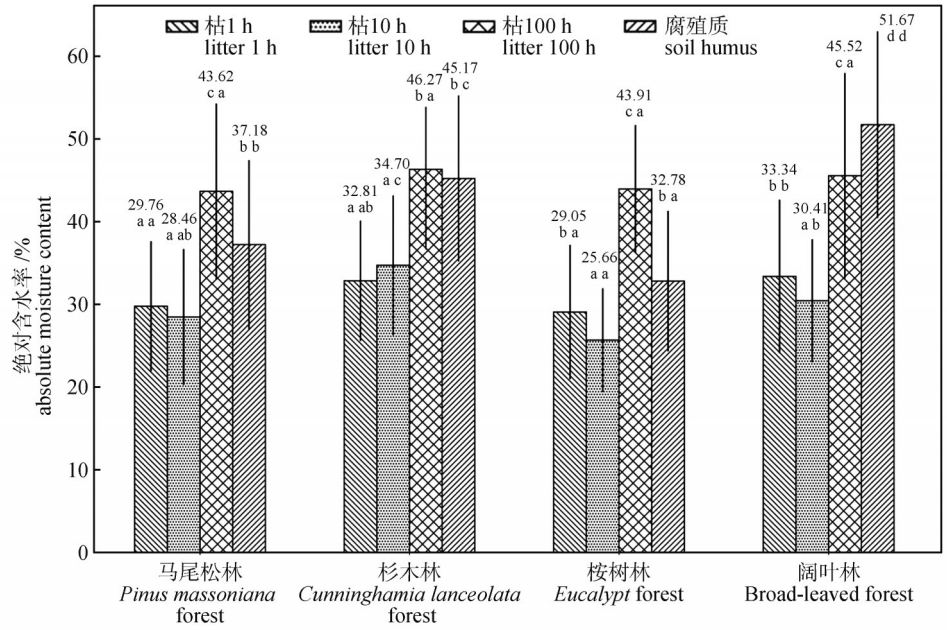
环境因子中，海拔、林分密度、郁闭度、平均胸径采用实测数据，坡向、坡度、坡位、林龄采用数字转换方法。根据《森林可燃物标准地调查技术规程》(第一次全国自然灾害综合风险普查技术规范，FXPC/LC F-01)，坡向共分为6类，其中，北坡(方位角22°~338°)为1，东北坡(方位角23°~67°)和西北坡(方位角293°~337°)为2，东坡(方位角68°~112°)和西坡(方位角248°~292°)为3，东南坡(方位角113°~157°)和西南坡(方位角203°~247°)为4，南坡(方位角158°~202°)为5，无坡向(坡度<5°)为6，数字越大越向阳；坡度共分为6类，其中，平坡(<5°)为0，缓坡(5°~14°)为1，斜坡(15°~24°)为2，陡坡(25°~34°)为3，急坡(35°~44°)为4，险坡(≥45°)为5，数字越大坡度越大；坡位分为5类，其中，平地和谷地为1，下坡为2，中坡为3，上坡为4，脊部为5，数字越大坡位越高；林龄分为4类，幼龄林为1，中龄林为2，近熟林为3，成过熟林为4，数字越大林龄越大。

采用Excel 2024对数据进行基础处理，采用R 4.0进行LSD多重比较和冗余分析，采用R 4.0和Origin 2019制图。

2 结果与分析

2.1 不同森林类型地表死可燃物含水率特征

4种森林类型地表死可燃物绝对含水率及多重比较结果见图2。腐殖质层可燃物绝对含水率中，桉树林最低(32.78%±12.12%)，阔叶林最高(51.67%±16.08%)；枯1 h的绝对含水率中，桉树林最低(29.05%±11.59%)，阔叶林最高(33.34%±13.25%)；枯10 h的绝对含水率中，马尾松林最低(28.46%±11.71%)，杉木林最高(34.70%±12.04%)；枯100 h的绝对含水率中，松树林最低(43.62%±15.14%)，杉木林最高(46.27%±13.80%)。



不同小写字母表示存在显著性差异。其中,第一个小写字母用于表示组内的显著性差异情况,第二个小写字母表示组间同一类型死可燃物的显著性差异情况。

Different lowercase letters indicate significant differences. The first lowercase letter denotes significant differences among deal fuel types within each forest type, whereas the second lowercase letter indicates significant differences among forest types for the same deal fuel type.

图2　不同林型地表死可燃物绝对含水率显著性差异分析

Fig. 2 Analysis of significant differences in the surface dead fuel absolute moisture content among different forest types

从显著性差异分析结果看,各类型森林内,枯100 h和腐殖质的绝对含水率均显著高于枯1 h和枯10 h,而枯1 h和枯10 h的绝对含水率差异不显著;不同森林类型间同一死可燃物类型绝对含水率存在差异,桉树林内各死可燃物含水率普遍低于其他森林类型,阔叶林的死可燃物含水率整体较高。相较于枯落物,腐殖质层的含水率在不同林分间表现更为显著。

2.2　地表死可燃物含水率与地形因子RDA分析结果

地表死可燃物绝对含水率与地形因子的RDA分析结果见表2和图3。RDA排序轴特征值显示,马尾松林、杉木林、桉树林和阔叶林前两轴的累计解释率分别为84.31%、88.28%、80.77%和77.77%,且以第一排序轴为主,排序结果良好。

在马尾松林中,海拔的解释量最高(0.312),其次为坡向(0.227)和坡度(0.184),地表死可燃物含水率与海拔均呈正相关,与坡向呈负相关,腐殖质的含水率与坡度呈显著相关,见图3(a);在杉木林中,海拔解释量最高(0.345),其次为坡向(0.244),其中枯落物的含水率均与海拔呈显著正相关,与坡向呈负相关,见图3(b);在桉树林中,坡度的解释量最高(0.213),其次为坡向(0.179),其中枯落物的含水率与坡向呈负相关,枯1 h和枯10 h的含水率与坡向呈负相关,见图3(c);在阔叶林中,海拔的解释量最高(0.273),其次为坡位(0.206),土壤腐殖质、枯1 h和枯100 h的含水率与海拔呈显著正相关,与坡位呈显著负相关,见图3(d)。整体来看,海拔是影响各森林类型最重要的地形因子,其次为坡向,相比阔叶林和桉树林,地形因子对松树林和杉木林的解释量更高。

2.3　地表死可燃物含水率与林分因子RDA分析结果

地表死可燃物绝对含水率与林分因子的RDA分析结果见表3和图4。RDA排序轴特征值显示,马尾松林、杉木林、桉树林和阔叶林前两轴的累计解释率分别为81.67%、91.73%、84.43%和81.88%,前两轴累计解释率略高于地形因子。

马尾松林中,郁闭度的解释量最高(0.328),其次为林分密度(0.285),枯落物与林分密度、郁闭度呈正相关,土壤腐殖质含水率主要与龄组呈正相关,见图4(a);杉木林中,郁闭度(0.339)解释量最高,其次为龄组(0.211),地表死可燃物与各林分因子之间均呈正相关,见图4(b);在桉树林中,平均胸径(0.274)的解释量最高,其次为林分密度(0.205)和龄组(0.181),在林分因子中,平均胸径、龄组和郁闭度箭头连线方向较为一致,均与枯落物含水率呈正相关,见图4(c);阔叶林分中,平均胸径(0.223)、林分密度(0.194)和龄组

表 2 地形因子与地表死可燃物含水率 RDA 显著性检验结果

Tab. 2 RDA significance test results of topographic factors on surface dead fuel moisture content

森林类型 forest type	因子类型 factor type	*P*	*F*	解释量 explained	森林类型 forest type	因子类型 factor type	*P*	*F*	解释量 explained
马尾松林 *Pinus massoniana* forest	海拔	0.002**	8.67	0.312	桉树林 *Eucalyptus* forest	坡度	0.023*	4.56	0.213
	坡向	0.018*	5.12	0.227		坡向	0.041*	3.89	0.179
	坡度	0.046*	3.45	0.184		坡位	0.156	1.67	0.098
	坡位	0.421	0.98	0.078		海拔	0.389	1.02	0.065
杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest	海拔	0.001**	9.23	0.345	阔叶林 Broadleaved forest	海拔	0.008**	6.78	0.273
	坡向	0.012*	5.89	0.244		坡位	0.031*	4.23	0.206
	坡度	0.103	2.34	0.152		坡度	0.214	1.45	0.129
	坡位	0.287	1.23	0.056		坡向	0.298	1.23	0.091

注：“*”$P<0.05$；“**”$P<0.01$。下同

Note: “*” $P<0.05$; “**” $P<0.01$. the same below.

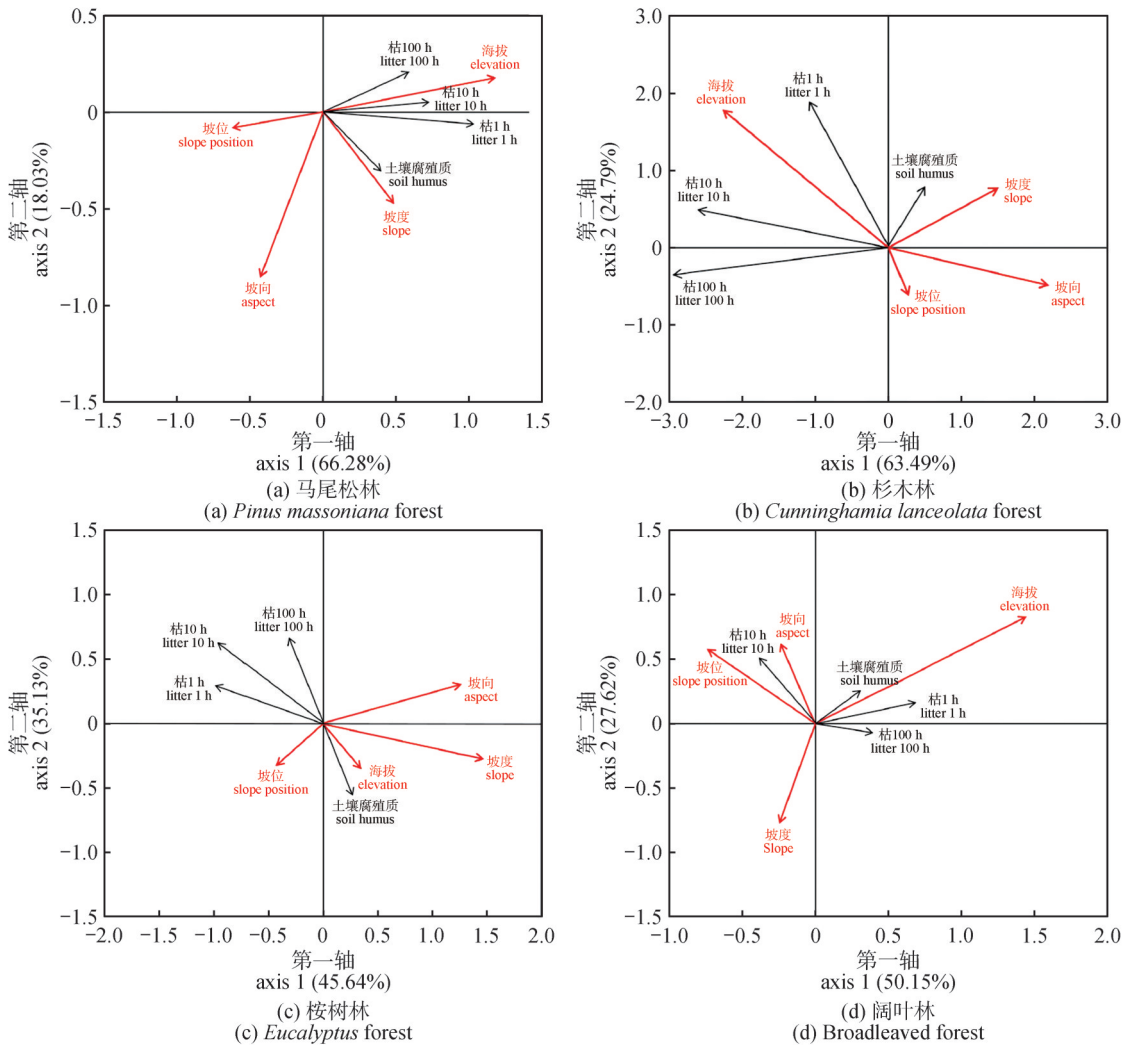


图 3 地表死可燃物与地形因子的 RDA 排序图

Fig. 3 RDA ordination diagram of surface dead fuels and topographic factors

表 3　林分因子与地表死可燃物含水率 RDA 显著性检验结果

Tab. 3　RDA significance test results of stand factors on surface dead fuel moisture content

森林类型 forest type	因子类型 factor type	*P*	*F*	解释量 explained	森林类型 forest type	因子类型 factor type	*P*	*F*	解释量 explained
马尾松林 *Pinus massoniana* forest	郁闭度	0.001**	9.12	0.328	桉树林 *Eucalyptus* forest	平均胸径	0.012*	4.56	0.274
	林分密度	0.003**	7.89	0.285		林分密度	0.028*	3.89	0.205
	龄组	0.087	2.45	0.094		龄组	0.046*	3.27	0.181
	平均胸径	0.298	1.23	0.078		郁闭度	0.389	1.02	0.080
杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest	郁闭度	0.001**	9.56	0.339	阔叶林 Broadleaved forest	平均胸径	0.018**	5.01	0.223
	龄组	0.008*	5.67	0.211		林分密度	0.033*	4.28	0.194
	林分密度	0.058*	3.21	0.154		龄组	0.047*	3.75	0.180
	平均胸径	0.134	1.89	0.072		郁闭度	0.087	1.93	0.121

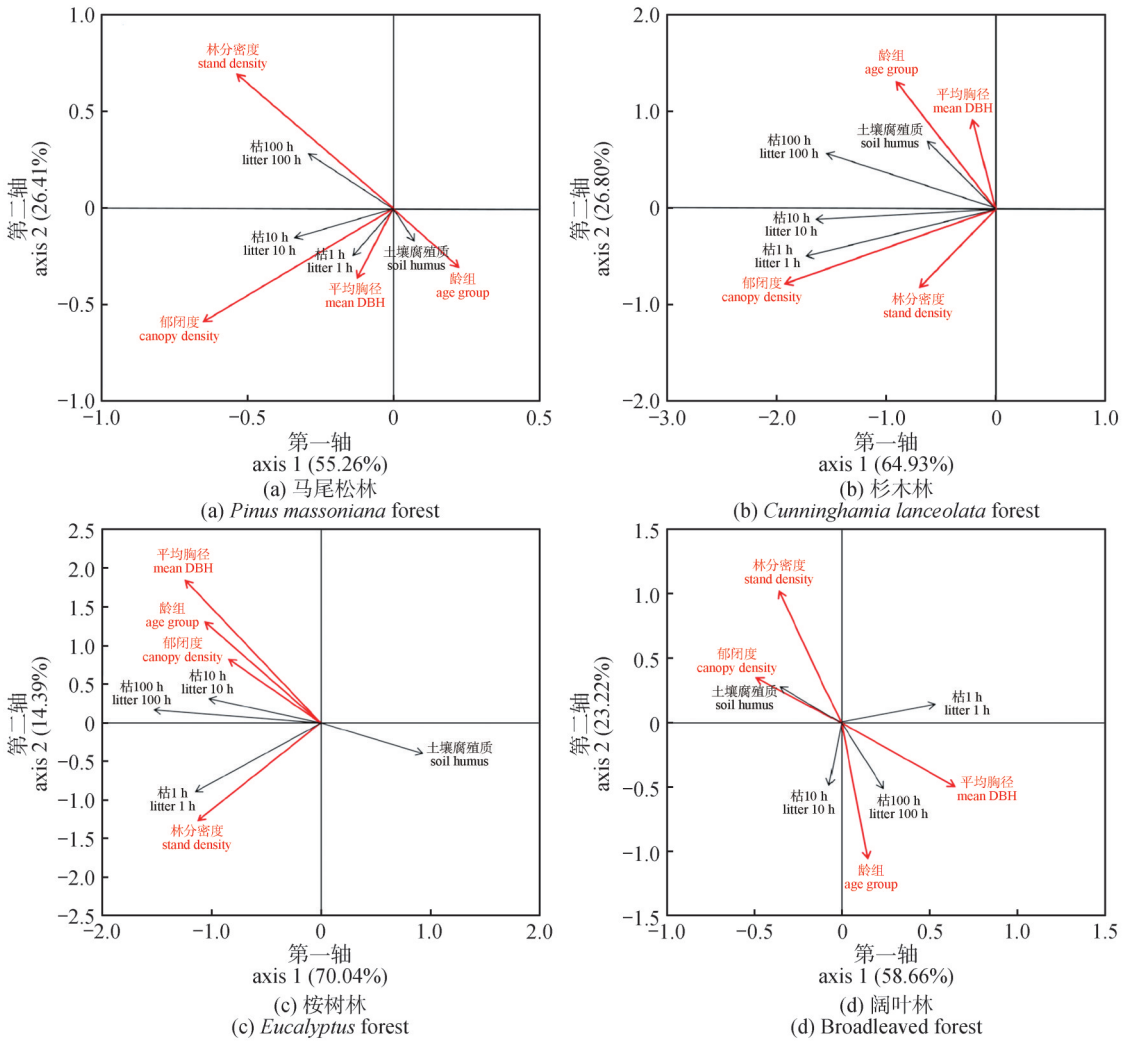


图 4　地表死可燃物与林分因子的 RDA 排序图

Fig. 4　RDA ordination diagram of surface dead fuels and stand factors

(0.180)的解释量较高,枯 10 h 和枯 100 h 的含水率受龄组影响较为明显,土壤腐殖质的含水率与郁闭度呈显著正相关,见图 4(d),相较于其他林分,阔叶林各林分因子对不同类型死可燃物的影响较为分散。

3 讨论

研究结果表明,广西 4 种森林类型地表死可燃物绝对含水率存在显著差异,这与大部分研究一致,表明不同林型之间可燃物含水率的差异具有普遍性[3,16-17,20]。各林分地表死可燃物含水率总体由大到小依次为阔叶林、杉木林、马尾松林、桉树林,桉树林冠相对稀疏,林内透光率高,相比之下,阔叶林林下环境通常更为湿润,有利于保持可燃物含水率[21-22]。本次研究结果中,枯 1 h 和枯 10 h 的含水率显著低于枯 100 h 和腐殖质层,这与部分研究中细小死可燃物具有高吸湿性的结果不一致[17],可能是因为本次样品采集时间为冬季,正值广西重点防火期,空气相对干燥,更大比表面积的枯 1 h 和枯 10 h,其失水速率快于枯 100 h 和最下层的土壤腐殖质[23-24]。

地形通过影响林地水热再分配和微气候条件,影响地表死可燃物含水率。研究显示,海拔和坡向是影响地表死可燃物最主要的地形因子,这与唐子桐等[17]、王文娟等[25]研究结果一致,各林分内死可燃物含水率普遍与海拔呈正相关,与坡向呈负相关,海拔升高导致气温降低、蒸发减弱,空气湿度变大,有利于保持可燃物含水率[11],坡向则通过影响太阳辐射接收量来调节水热条件,阴坡接收的太阳辐射较少,死可燃物含水率普遍高于阳坡[18]。杉木林、马尾松林死可燃物含水率受地形因子的影响高于阔叶林,这可能是因为针叶林林冠结构相对稀疏,林内透光率较高,地形对微气候的调节作用能够更直接地传导至地表。桉树林地表死可燃物含水率受海拔影响较小,可能与桉树人工林主要分布在海拔较低的丘陵平原区有关,同时,桉树林经营管理频繁,可能在一定程度上影响了地形的水热效应[26]。

研究显示,在松树、杉木和桉树林中,地表死可燃物绝对含水率普遍与林分密度和郁闭度呈显著正相关,较高的郁闭度和林分密度能够有效地降低地表太阳辐射强度和温度峰值,减弱林下水分蒸发,进而保持林下可燃物含水率[27-28],这种调控作用可能在经营干预较强、密度差异较大的人工林中体现得尤为明显。阔叶林地表死可燃物含水率受龄组与郁闭度影响明显,但整体林分因子对不同类型死可燃物的含水率解释较为分散,这可能是随着林龄增长,林冠层次丰富,导致林内光照、温湿度等微环境空间较为复杂,因此难以表现出高度一致的规律[21,25]。

本研究分析了主要地形因子和林分因子对不同森林类型死可燃物含水率的影响,但未考虑土壤理化性质、气象因子对死可燃物含水率的影响,可燃物类型未包括灌木、草本等地表活可燃物,且缺乏对可燃物含水率动态变化的连续监测。未来应开展多时段、跨季节的定位监测,引入遥感反演、物联网监测等新技术手段,实现对可燃物含水率的大尺度、实时化监测与预警,并针对性地建立适用于广西不同森林类型的地表死可燃物含水率预测模型,为广西森林可燃物管理提供更精细化的依据。

4 结论

本研究以广西 4 种典型森林类型(马尾松林、杉木林、桉树林、阔叶林)为研究对象,探究不同森林类型地表死可燃物含水率特征及与环境因子的关系。研究表明,不同森林类型地表死可燃物含水率存在显著差异,总体由大到小表现为阔叶林、杉木林、马尾松林、桉树林,腐殖质含水率差异相比枯落物更显著。海拔和坡向是影响地表死可燃物含水率最主要的地形因子,地表死可燃物普遍与海拔呈正相关,与坡度呈负相关。林分密度和郁闭度对马尾松、杉木和桉树等人工林影响较为显著,多呈正相关关系,阔叶林还受龄组影响显著,但相比其他树种林分,不同林分因子对地表死可燃物含水率影响较为分散。研究结果可为广西制定差异化的可燃物管理措施提供参考依据。

参 考 文 献

[1] Turetsky R M, Kane S E, Harden W J, et al. Recent acceleration of biomass burning and carbon losses in Alaskan forests and peatlands[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(1): 27-31.

[2] 文刚,周仿荣,马仪,等. 滇西南地区典型森林可燃物燃烧特性实验研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2024,46(6):871-877.
Wen Gang, Zhou Fangrong, Ma Yi, et al. Experimental study on the combustion characteristics of typical forest fuels in the southwest area of Yunnan Province[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2024, 46(6): 871-877.

[3] Ray C D, Gattani N, Castillo E D, et al. Identification of the relationship between equilibrium moisture content, dry bulb temperature, and relative humidity using regression analysis[J]. Wood & Fiber Science (Society of Wood Science & Technology), 2007, 39(2): 299-306.

[4] 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 Ziyuan, Hu Haiqing, Zhang Yunlin, 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.

[5] 胡海清,陆昕,孙龙,等. 气温和空气相对湿度对森林地表细小死可燃物平衡含水率和时滞的影响[J]. 植物生态学报,2016,40(3):221-235.
Hu Haiqing, Lu Xin, Sun Long, et al. Effects of air temperature and relative humidity on equilibrium moisture content and time-lag of forest land surface dead fine fuels[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(3): 221-235.

[6] 金森,刘礴霏,邸雪颖,等. 平地无风条件下蒙古栎阔叶床层的火行为Ⅰ蔓延速率影响因子与预测模型[J]. 应用生态学报,2012,23(1):51-59.
Jin Sen, Liu Bofei, Di Xueying, et al. Fire behavior of Mongolian oak leaves fuel-bed under no-wind and zero-slope conditions Ⅰ factors affecting fire spread rate and modeling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 51-59.

[7] Fan J L, Hu T X, Ren J S, et al. A comparison of five models in predicting surface dead fine fuel moisture content of typical forests in Northeast China[J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2023, 6: 1122087.

[8] Rothermel R C, Forest I. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[R]. Ogden, UT: USDA Forest Service Intermountain Forest and Range ExperimentStation, 1972: 25-26.

[9] Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian forest fire behavior prediction system[M]. Ottawa: Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate, 1992: 63.

[10] 侯祥,吴志伟,赵攀,等. 森林地表可燃物含水率研究进展及展望[J]. 应用与环境生物学报,2025,31(12):1977-1986.
Hou Xiang, Wu Zhiwei, Zhao Pan, et al. Research progress and prospects of the forest surface fuel moisture content[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(12): 1977-1986.

[11] 田甜,邸雪颖. 森林地表可燃物含水率变化机理及影响因子研究概述[J]. 森林工程,2013,29(2):21-25,142.
Tian Tian, Di Xueying. Research review on change mechanism and impact factors of forest surface fuel moisture[J]. Forest Engineering, 2013, 29(2): 21-25, 142.

[12] 胡海清,罗斯生,罗碧珍,等. 森林可燃物含水率及其预测模型研究进展[J]. 世界林业研究,2017,30(3):64-69.
Hu Haiqing, Luo Sisheng, Luo Bizhen, et al. Forest fuel moisture content and its prediction model[J]. World Forestry Research, 2017, 30(3): 64-69.

[13] 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 Jie, Niu Shukui, Chen Feng. The relationship between equilibrium moisture content, time-lag of dead fuels and temperature and humidity in central Yunnan[J]. Ecological Science, 2019, 38(1): 26-32.

[14] 金森,周勇. 昆明典型地表死可燃物含水率预测模型的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(12):7-15.
Jin Sen, Zhou Yong. Study on moisture content prediction model of dead surface fuels in typical stands, Kunming[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(12): 7-15.

[15] 金森,刘万龙. 江西南昌典型林分地表死可燃物含水率预测——方法优选与FWI适用性分析[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(11):1-8.
Jin Sen, Liu Wanlong. Prediction on moisture contents of typical forest-land surface dead fuels in Nanchang City, Jiangxi Province: Method optimization and FWI applicability[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(11): 1-8.

[16] 严思晓,刘万,林雪儿,等. 武夷山风景名胜区森林地表可燃物含水率特征及其与环境因子的关系[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(1):146-154.
Yan Sixiao, Liu Wan, Lin Xue'er, et al. Characteristics of forest surface fuel moisture contents and their relationships with environmental factors in Wuyi Mountain scenery district[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(1): 146-154.

[17] 唐子桐,田青,王艳莉,等. 甘肃太子山不同林型森林可燃物含水率与环境因子的关系[J]. 甘肃农业大学学报,2022,57(6):140-147.
Tang Zitong, Tian Qing, Wang Yanli, et al. Characteristics of forest fuel water content in different forest types and its relationship with environmental factors in Taizi Mountain, Gansu Province[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(6): 140-147.

[18] 胡海清,梁宇,孙龙,等. 室内模拟坡向和坡度对可燃物含水率的影响[J]. 森林与环境学报,2016,36(1):80-85.
Hu Haiqing, Liang Yu, Sun Long, et al. Effects of simulated aspect and gradient of slope on moisture of combustible material in laboratory[J]. Journal of Forest and Envi-

ronment,2016,36(1):80-85.

[19] 苏宗明. 广西植被[M]. 北京:中国林业出版社,2014.
Su Zongming. The vegetation of Guangxi[M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2014.

[20] 王珊,冯仲科,郁壮,等. 模拟降雨下以小时为步长的崇礼区典型林分地表细小死可燃物含水率预测模型[J]. 应用与环境生物学报,2023,29(4):913-921.
Wang Shan, Feng Zhongke, Yu Zhuang, et al. Prediction model of surface dead fine fuel moisture content at one-hour intervals in a typical stand under simulated rainfall in the Chongli District, Zhangjiakou City, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023,29(4):913-921.

[21] Brown T P, Inbar A, Duff T J, et al. Forest structure drives fuel moisture response across alternative forest states[J]. Fire,2021,4(3):48.

[22] Stickley S F, Fraterrigo J M. Understory vegetation contributes to microclimatic buffering of near-surface temperatures in temperate deciduous forests[J]. Landscape Ecology,2021,36:1197-1213.

[23] 满子源. 江西南昌森林可燃物含水率动态变化及湿度码适用性研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2020.
Man Ziyuan. Study on the fuel moisture code and dynamic of forest fuel moisture content in Nanchang City, Jiangxi Province[D]. Harbin:Northeast Forestry University,2020.

[24] 张佐忠,高德民,王浩宇,等. 地表细小死可燃物小时步长的含水率预测模型[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2024,44(5):147-156.
Zhang Zuozhong, Gao Demin, Wang Haoyu, et al. Moisture content prediction model for hourly steps of small dead combustibles on the surface[J]. Journal of Southwest Forestry University:Natural Sciences,2024,44(5):147-156.

[25] 王文娟,常禹,刘志华,等. 大兴安岭呼中林区地表死可燃物含水量及其环境梯度分析[J]. 生态学杂志,2009,28(2):209-215.
Wang Wenjuan, Chang Yu, Liu Zhihua, et al. Ground surface dead fuel moisture content in Huzhong forest area of Great Xing'an Mountains and its environmental gradient analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 209-215.

[26] 崔自杰,孙阁,张瑶琦,等. 中国桉树人工林水文效应研究进展[J]. 林业科学,2025,61(7):129-139.
Cui Zijie, Sun Ge, Zhang Yaoqi, et al. Research progress of the hydro logical effects of eucalyptus plantations in China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61 (7): 129-139.

[27] 肖石红,张中瑞,覃德华,等. 天宝岩国家级自然保护区4种类型泥炭藓沼泽植被组成及其与环境因子的关系[J]. 应用与环境生物学报,2016,22(4):631-638.
Xiao Shihong, Zhang Zhongrui, Qin Dehua, et al. Community composition of four types of Sphagnum wetlands and its relationship with environmental factors in Tianbaoyan National Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biolog,2016,22(4):631-638.

[28] 武军. 森林地表细小可燃物载量和含水率分布特性的研究[D]. 北京:中国科学技术大学,2011.
Wu Jun. Study of distribution characteristics of forest surface fuel load and moisture content[D]. Beijing: University of Science and Technology of China,2011.