

# 油松林地表可燃物类型和径级对平衡含水率和时滞的影响

孙永明<sup>1</sup> 贺洪鑫<sup>2</sup>

(1.山西省林业和草原科学研究院, 山西 太原 030012; 2.汾阳市林业局, 山西 汾阳 032299)

**摘要:**【目的】对不同类型、不同径级的地表可燃物的平衡含水率和时滞变化特征进行分析, 从而为地表可燃物的科学管理提供理论依据。【方法】在油松林中采集不同径级的枯枝、半腐殖质和松针等地表可燃物, 在恒定温湿度的条件下测定各可燃物的平衡含水率和时滞, 并通过多重比较法分析可燃物种类和径级大小分别对平衡含水率和时滞的影响。【结果】地表可燃物平衡含水率和时滞受到可燃物种类的强烈影响, 半腐殖质的平衡含水率和时滞均为最高, 并显著高于松针和枯枝。此外, 平衡含水率和时滞均随着枯枝径级的增加而增大, 但这种影响却不是很显著。【结论】本研究首次发现油松林地表可燃物平衡含水率和时滞在不同可燃物类型和径级间的变化规律, 这有助于提高地表可燃物含水率的预测和管理能力。

**关键词:** 地表可燃物; 径级; 平衡含水率; 时滞; 油松林

## Effects of surface fuel types and diameter class on equilibrium moisture content and time-tag in *Pinus tabulaeformis* forest

**Abstract:** [Objective] This paper aims to analyze the equilibrium moisture content and time-tag variation characteristics of different types and different diameter classes of surface fuels, so as to provide theoretical basis for scientific management of surface fuels. [Methods] The surface fuels such as dead branches of different diameter classes, semi-humus and pine needles were collected from *Pinus tabulaeformis* forest. The equilibrium moisture content and time-lag of each surface fuel were measured under the condition of constant temperature and humidity, and the effects of surface fuel types and diameter classes on the equilibrium moisture content and time-lag were analyzed by multiple comparison method. [Results] The equilibrium moisture content and time-lag of surface fuels were strongly affected by the types of surface fuels. The equilibrium moisture content and time-lag of semi-humus were the highest, and were significantly higher than those of pine needles and dead branches. In addition, the equilibrium moisture content and time-lag increased with the increase of dead branch diameter class, but such effects were not very significant. [Conclusions] This study is the first to find the variation of equilibrium moisture content and time-tag of forest surface fuels between different fuel types and diameter classes, which is helpful to improve the prediction and management ability of surface fuel water content in *Pinus tabulaeformis* forest.

**Key Words:** surface fuels; diameter class; equilibrium moisture content; time-lag; *Pinus tabulaeformis* forest

### 前言

森林可燃物是森林生态系统中必不可少的组成部分之一, 是森林燃烧的物质基础<sup>[1]</sup>。可燃物含水率的大小, 特别是地表可燃物的含水率在很大程度上决定了森林燃烧的难易程度, 能够间接影响林火的发生和蔓延程度<sup>[2]</sup>。因此, 森林可燃物含水率的预测一直都是林火研究的重中之重<sup>[3-4]</sup>, 这对于地表可燃

物的管理乃至森林火灾风险的预测非常重要。

虽然关于可燃物含水率预测的方法有许多,比如平衡含水率法、过程模拟法、遥感估测法和气象要素回归法<sup>[5-7]</sup>,但平衡含水率法是比较主流且十分精确和可靠的方法<sup>[8-9]</sup>。不同于美国和加拿大等国家,国内对于平衡含水率的研究不仅起步较晚,而且现有的研究仅在部分地区的一些林分中开展<sup>[10]</sup>。例如,胡海清等人(2016)对落叶松和白桦林地表面细小可燃物的研究表明气温与可燃物平衡含水率和时滞呈负相关关系,而空气相对湿度与二者均呈正相关关系<sup>[11]</sup>。王婕等人(2019)对滇中地区云南松和滇青冈林地表面死可燃物的研究同样发现,可燃物平衡含水率和时滞受温湿度的影响显著,平衡含水率和时滞均随温度的升高而减小,随湿度的增加而增大<sup>[12]</sup>。然而,平衡含水率在其它地区或林型还缺乏广泛的研究,并且缺乏可燃物类型和径级等自身性质对平衡含水率和时滞的影响。

油松(*Pinus tabulaeformis*)材质优良,适应性强,作为我国北方广大地区最主要的造林树种之一<sup>[13]</sup>,油松林在山西森林中分布最广,面积最大,是一个典型的森林类型。但由于油松含有大量易燃松脂以及油松林可燃物载量大的特性,山西省内发生的重、特大森林火灾基本都发生在油松林。虽然过去对油松林森林可燃物的研究已经取得一些重要进展<sup>[14-15]</sup>,但目前还缺乏有关山西省内油松林地表面可燃物含水率的重点分析。因此,本研究在温度 25℃,湿度 30%的条件下,通过测定山西省油松林不同类型、不同径级地表可燃物在各个时间点的含水率,估算不同地表可燃物的平衡含水率和时滞,进而分析可燃物类型和径级对平衡含水率和时滞的影响,这对于油松林各类地表可燃物的科学管理、山西省森林火灾发生规律的认识以及林火的预测具有十分重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市安泽县(即太岳山东南麓),处于东经 112°00'33"~112°35'02",北纬 35°53'28"~36°30'24"之间,境内地形复杂,最高海拔为 1592 米,整体地势呈现为北高南低。该地区属暖温带大陆性季风气候,四季分明,全年平均日照为 2246.1 小时,日照率为 51%,年平均气温为 9.4℃,年平均降水量为 539.1mm 左右,全年无霜期 172 天左右,形成了独特的小气候。从植被资源来看,该地区属于暖温带落叶阔叶林植被区域,森林资源比较丰富,有林地总面积达 198 万亩,森林覆盖率达 70%,居山西省第一位。油松为林区的优势树种,其它乔木树种主要包括侧柏(*Platycladus orientalis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)和白皮松(*Pinus bungeana*)等,灌木植物主要包括黄栌(*Cotinus coggygria*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、杜梨(*Pyrus betulifolia*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)和绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等,另有草本植物 1000 余种。天然油松林一般由 3-4 个树种构成,为了避免其它树种对油松林可燃物组成的影响,本研究所有样品均采集自安泽县的油松人工林。

### 1.2 样品采集与测定

样品采集前，以第九次安泽县森林资源连续清查数据和安泽县森林资源“一张图”为基础，结合遥感数据，分析安泽县油松人工林森林可燃物植被特征和分布情况，依据植被等要素的差异，选取人工中龄高郁闭度（0.7 以上）、中郁闭度（0.5-0.69）、低郁闭度（0.3-0.49）各三块油松林进行调查标准地区划与地表森林可燃物调查与采样。

于 2021 年 9 月在区划好的调查标准地内对其地表可燃物凋落物层进行调查与采样。每块调查标准地边长 25.82m，面积 666.67m<sup>2</sup>的正方形，在标准地四角对角线距顶点 1m 处设置 4 块 1 m × 1 m 的重复样方，然后将 4 块样方中采集的地表可燃物进行混合，每块标准地称取 1.2kg 可燃物样品带回实验室备用，根据以下步骤测定其含水率：

(1) 取样品 10kg 进行可燃物的分类，主要划分为：半腐殖质、松针和枯枝可燃物。然后用游标卡尺测定枯枝可燃物样品的径级，并将径级划分为 3 个级别： $d < 0.6 \text{ cm}$ 、 $0.6 \text{ cm} \leq d < 2.5 \text{ cm}$  和  $d \geq 2.5 \text{ cm}$ 。

(2) 将各类型和各径级可燃物样品分别放入烘箱，在 80℃ 条件下烘干 24 小时以上，直至质量不再变化，使用电子天平记录此时的重量，即为样品干重。

(3) 将烘干后的样品完全浸泡于水中直至饱和，取出浸泡的样品，用吸水纸轻拭掉表面的水分，水平摆放在实验台，静置 2 小时后称重，记录数据作为各类样品的初始湿重。

(4) 将各类样品分别放入温湿度培养箱内，温度设置为 25℃，湿度设置为 30%，每隔 2 小时称一次质量并记录，直到前后两次称量结果计算出的含水率的差值小于 1%时停止实验，此时可燃物的含水率被认为是平衡含水率。可燃物含水率的计算公式如下：

$$\text{可燃物含水率} = \frac{\text{样品湿重} - \text{样品干重}}{\text{样品干重}} \times 100\%$$

按照上述步骤，分别对每种可燃物样品进行三次重复，详细记录可燃物在不同时间点的样品湿重，并计算其对应时间点的含水率，直至最终达到平衡含水率。

### 1.3 数据处理

在温度和湿度恒定的条件下，可燃物在失水过程中的含水率满足以下公式（金森等, 1999），将可燃物样品的实测数据代入该公式可计算出可燃物含水率到达平衡状态之前的任意时刻的含水率以及可燃物时滞。

$$M_t = M_e + (M_0 - M_e)e^{-kt}$$

$$\tau = \frac{1}{k}$$

式中： $M_t$  表示可燃物在时间  $t$  时的含水率%； $M_e$  表示可燃物的平衡含水率%； $M_0$  表示可燃物的初始含水率%； $t$  表示时间 h； $k$  为比例系数，表示时滞的倒数； $\tau$  表示可燃物时滞 h。

接下来, 根据研究目的在 Excel 2019 软件中对原始数据进行整理和初步处理 (例如对三次重复的数据取平均值), 然后在 SPSS 26.0 软件中利用多重比较法分别对比分析不同类型、不同径级地表可燃物的平衡含水率和时滞的差异。具体来看, 本文采用邓肯 (Duncan) 多重极差检验法在  $P = 0.05$  水平上进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表可燃物类型对平衡含水率和时滞的影响

对于不同类型的森林地表可燃物, 本研究运用多重比较法对油松林地表的枯枝、松针和半腐殖质三种可燃物的平衡含水率和时滞的变化特征进行分析, 结果分别如图 1a 和图 1b 所示。整体来看, 平衡含水率和时滞在三种地表可燃物之间表现出相同的变化趋势。

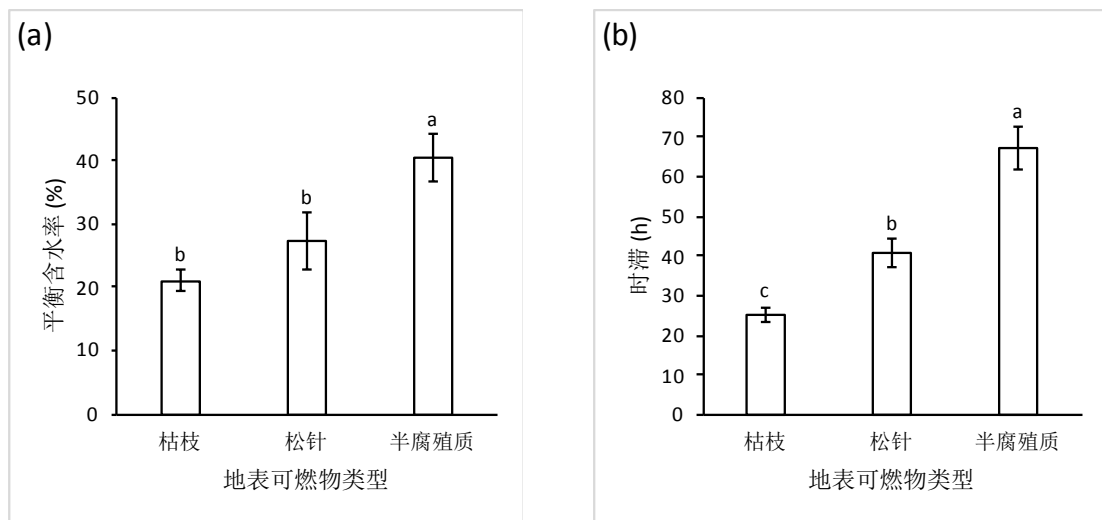


图 1 油松林不同类型地表可燃物的平衡含水率和时滞比较

Figure 1 Comparison of equilibrium moisture content and time-tag of different surface fuels in *Pinus tabulaeformis* forest

由图 1a 可知, 三种地表可燃物的平衡含水率从大到小依次为: 半腐殖质 (40.46%) > 松针 (27.37%) > 枯枝 (21.04%)。多重比较的结果显示半腐殖质的平衡含水率显著高于松针和枯枝 ( $P < 0.05$ ), 但松针和枯枝的平衡含水率之间没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。而由图 1b 可知, 时滞表现出类似于平衡含水率的变化趋势, 即半腐殖质 (67.29 h) > 松针 (40.78 h) > 枯枝 (25.25 h), 且多重比较结果显示时滞在三种地表可燃物之间均有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 枯枝可燃物径级对平衡含水率和时滞的影响

对于不同径级的地表枯枝可燃物, 本研究同样运用多重比较法对  $d < 0.6$  cm、 $0.6$  cm  $\leq d < 2.5$  cm 和  $d \geq 2.5$  cm 三种径级可燃物的平衡含水率和时滞的变化特征进行分析, 结果分别如图 2a 和图 2b 所示。整体来看, 平衡含水率和时滞均随着枯枝径级逐渐变大而变大。

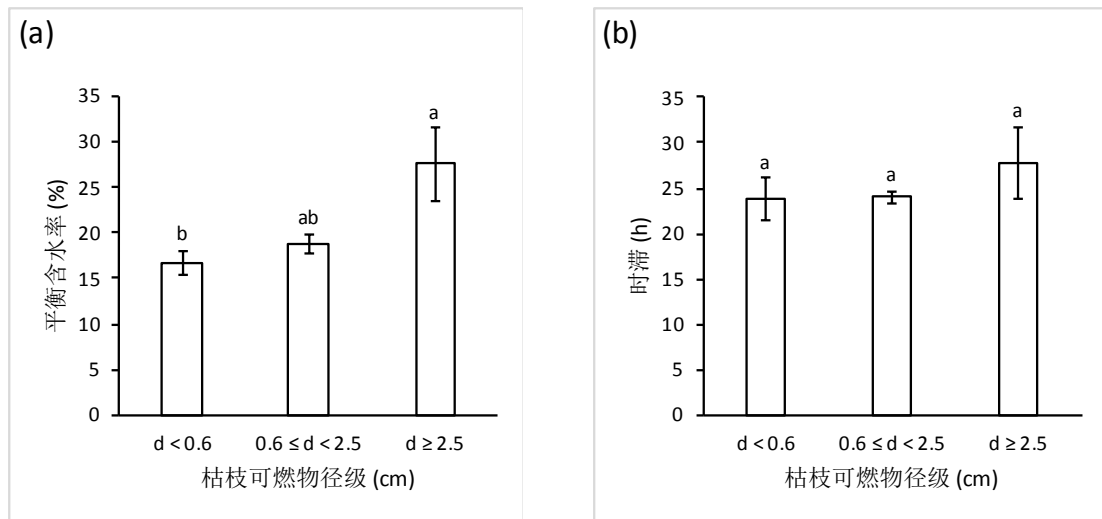


图2 油松林不同径级地表可燃物的平衡含水率和时滞比较

Figure 2 Comparison of equilibrium moisture content and time-tag of surface fuels with different diameter classes in *Pinus tabulaeformis* forest

由图 2a 可知,  $d \geq 2.5$  cm、 $0.6 \text{ cm} \leq d < 2.5 \text{ cm}$  和  $d < 0.6 \text{ cm}$  三种径级可燃物的平衡含水率从大到小依次为 27.59%、18.82%和 16.71%。多重比较结果显示  $d \geq 2.5 \text{ cm}$  径级的平衡含水率显著高于  $d < 0.6 \text{ cm}$  径级 ( $P < 0.05$ ), 但其它两两径级间没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。由图 2b 可知, 虽然可燃物时滞同样随着径级的变大逐渐变大, 但是不同径级之间的可燃物时滞均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 3 讨论与结论

森林地表可燃物的含水率是影响林火燃烧强度和蔓延速度的关键因素, 是判断林火能否发生以及进行林火发生预报的重要因子<sup>[16]</sup>。大量研究证实可燃物含水率由可燃物自身的性质和外界环境因子(温度、相对湿度、降水量、太阳辐射和风速等)共同决定<sup>[17]</sup>, 其中, 细小可燃物含水率大小更是火灾发生的关键因素, 对火灾能否发生影响最大。目前, 关于可燃物自身以外的环境因素影响其含水率的研究已经取得许多进展, 王得祥等人(1996年)早在上世纪就对细小可燃物含水率与气象因子的关系进行深入研究<sup>[18]</sup>, 张思玉等人(2006年)解析了地表可燃物含水率对风速、空气相对湿度、空气温度和地表温度等主要火环境因子的响应机制<sup>[19]</sup>, 而田甜和邸雪颖(2013年)对森林地表可燃物含水率变化机理及影响因子的研究进行了概述<sup>[20]</sup>。平衡含水率和时滞作为有关含水率预测的重要指标, 已有的研究主要是针对两者预测可燃物含水率的精度以及两者对温湿度变化的响应机制(金森和李亮, 2010; 胡海清等, 2016), 但可燃物自身性质对平衡含水率和时滞的影响缺乏广泛而深入的研究。面对这一情况, 本研究选择在林火风险比较大的油松林中采集不同种类、不同径级的地表可燃物, 并探究可燃物种类和径级对平

衡含水率和时滞的影响。研究发现可燃物种类对平衡含水率和时滞的影响比较强烈,尤其是半腐殖质的平衡含水率和时滞均显著大于松针和枯枝,这可能是由于半腐殖质中除了松针和枯枝,还包括树皮等,而树皮相较于松针和枯枝的吸水能力强、失水速度慢,所以半腐殖质可燃物的平衡含水率和时滞最大(韩岳宏等, 2018)。同时,松针的平衡含水率和时滞大于枯枝也是因为类似的原因。然而,可燃物径级对平衡含水率和时滞的影响比较小,特别是时滞在不同径级之间并没有显著差异,这可以说明可燃物的失水速度在 0.6 cm ~ 2.5 cm 径级之间没有显著变化。另一方面,只有径级大于 2.5 cm 的可燃物的平衡含水率显著高于径级小于 0.6 cm 的可燃物,这是因为径级较大的枯枝的持水能力较强,所以平衡含水率更大 [20]。

本文首次在油松林中探究地表可燃物种类及径级大小对平衡含水率和时滞的影响,填补了国内对可燃物含水率相关性状变化特征的研究空白。一方面,研究发现可燃物的平衡含水率和时滞主要受到可燃物种类的强烈影响,而径级大小不足以引起平衡含水率和时滞的显著变化,所以地表可燃物的管理需要重点关注可燃物的类型,对不同可燃物采取不同的管理方式。另一方面,由于半腐殖质的平衡含水率和时滞均显著大于松针和枯枝,所以管理人员需要采取一系列措施促进枯落物的分解以提高半腐殖质可燃物所占的比例,最终达到有效地降低森林火灾发生风险的目的。

### 参考文献

- [1] 单延龙, 张敏, 于永波. 森林可燃物研究现状及发展趋势[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2004, 5(03): 264-269.
- [2] 金森, 李绪尧, 李有祥. 几种细小可燃物失水过程中含水率的变化规律[J]. 东北林业大学学报, 2000, (01): 35-38.
- [3] 李丹, 杨丽萍, 贾成联. 大兴安岭不同林型地表死可燃物含水率特征及其影响因子[J]. 干旱气象, 2021, 39(01): 144-150.
- [4] 王瑞君, 于建军, 郑春艳. 森林可燃物含水率预测及燃烧性等级划分[J]. 森林防火, 1997, (02): 16-17.
- [5] Catchpole E A, Catchpole W R, Viney N R. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, 10(02): 215-222.
- [6] Matthews S, Gould J, Mccaw L. Simple models for predicting dead fuel moisture in eucalyptus forests[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, 19(04): 459-467.
- [7] 刘昕, 邸雪颖. 三种方法对森林地表可燃物含水率的预测评价[J]. 森林工程, 2013, 29(02): 8-13, 20.
- [8] 刘曦, 金森. 平衡含水率法预测死可燃物含水率的研究进展[J]. 林业科学, 2007, 43(12): 126-133.
- [9] 金森, 李亮. 时滞和平衡含水率直接估计法的有效性分析[J]. 林业科学, 2010, 46(02): 95-102.
- [10] 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.
- [11] 胡海清, 陆昕, 孙龙, 曲智林, 梁宇, 李海洋. 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, (03): 221-235.
- [12] 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(01): 26-32.

- [13] 王国祥. 山西森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [14] 朱敏, 刘晓东, 李璇皓, 韩骁, 任云卯, 王奇峰. 北京西山油松林可燃物调控的影响评价[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4483-4491.
- [15] 李连强, 牛树奎, 陶长森, 陈羚, 陈锋. 妙峰山油松林分结构与地表潜在火行为相关性分析[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(01): 73-81.
- [16] 舒立福, 张小罗, 戴兴安, 田晓瑞, 王明玉. 林火研究综述(II)——林火预测预报[J]. 世界林业研究, 2003, (04): 34-37.
- [17] 肖化顺, 曾思齐, 谢绍锋, 刘发林. 森林可燃物管理研究进展[J]. 世界林业研究, 2009, 22(01): 48-53.
- [18] 王得祥, 徐钊, 张景群, 朱德兰. 细小可燃物含水率与气象因子关系的研究[J]. 西北林学院学报, 1996, 11(01): 35-39.
- [19] 张思玉, 蔡金榜, 陈细目. 杉木幼林地表可燃物含水率对主要火环境因子的响应模型[J]. 浙江农林大学学报, 2006, 23(04): 439-444.
- [20] 蒋雨芮, 谭波, 杨万勤, 常晨晖, 王壮, 汪沁, 黎静好, 余麟. 亚高山林区河岸带康定柳木质残体持水能力随径级的变化特征[J]. 生态学杂志, 2020, (02): 444-450.