

春季降雨对鲁东低山丘陵区主要森林类型地表可燃物含水率的影响

解国磊¹,丁新景¹,敬如岩¹,马风云^{1,2},马丙尧³,邢尚军³,彭一丹⁴,高燕⁵,苑晓雯⁵

(1. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东农业大学 生态与环境实验室, 山东 泰安 271018;
3. 山东省林业科学研究院, 山东 济南 250014; 4. 郯城县旅游局, 山东省临沂市郯城县, 276000;
5. 烟台市昆嵛山林场, 山东 烟台 264112)

摘 要:以山东省莱芜市香山地区 2 种主要森林类型地表死可燃物为研究对象,从 2015 年 3 月中旬开始分别观测不同地表死可燃物的含水率,分析 3 次降雨对不同地表死可燃物含水率的影响;根据野外观测的气象数据,分析可燃物含水率与部分气象因子的相关性;并且测定不同林分枯落叶的熄灭含水率,结合熄灭含水率分析雨后不同林分的火险情况。结果表明:1)不同可燃物类型含水率受降雨影响程度具有差异性,麻栎林内,降雨前后可燃物含水率变异率表现为枯落叶>10 h 枯枝>1 h 枯枝;油松林内表现为 10 h 枯枝>1 h 枯枝>枯落叶。并且 3 次不同的降雨对可燃物含水率影响具有差异性,第 1 次降雨对可燃物含水率影响较小,第 2 次降雨较大,第 3 次降雨中等。不同可燃物类型含水率雨后衰减率具有差异性,麻栎林内,可燃物含水率 3 次降雨后衰减率绝对值均表现为枯落叶>10 h 枯枝>1 h 枯枝;油松林内表现为 10 h 枯枝>1 h 枯枝>枯落叶。2)所调查 6 种可燃物类型含水率与空气相对湿度均呈极显著正相关,与林内空气温度呈负相关,但未达到显著水平,与林内平均风速呈极显著负相关。3)麻栎、油松枯落叶熄灭含水率分别为 16.62%、23.23%,降雨导致栎林、油松林地地表枯落叶含水率增大,枯落叶含水率在雨后一定时间内,高于熄灭含水率,此时,林内无火灾危险;但随着降雨结束,雨后天数的增加,林内枯落叶含水率降低,当低于熄灭含水率时,林内开始有火灾危险。

关键词:地表死可燃物;含水率;降雨;气象要素

中图分类号:S762.33 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)05-0171-07

The Influence of Rainfall on the Moisture Content of Surface Fuel of Main Forest Types in Mountainous Area of Shandong Province

XIE Guo-lei¹, DING Xin-jing¹, JING Ru-yan¹, MA Feng-yun^{1,2}, MA Bing-yao³, XING Shang-jun³,
PENG Yi-dan⁴, GAO Yan⁵, YUAN Xiao-wen⁵

(1. Forestry College, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 2. Ecological and Environmental Laboratory, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 3. Research Institute of Forestry Science in Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China; 4. Tourism Bureau of Tancheng County, Linyi Shandong Province, 276000, China; 5. Kunyushan Forest Farm of Yantai, Yantai, Shandong 264112, China)

Abstract: To study the effects of rainfall on the moisture content of the dead fuel, we took 2 main forest types of surface dead fuel in Mount Tai as the research objects. We measured the moisture content of surface dead fuel from the beginning of March 2015, and analyzed the influence of rainfall on the moisture content of dead fuel in different surfaces. According to the meteorological data observed in the field, we analyzed the relationship between moisture content of the fuel and some meteorological factors. We measured

the extinction moisture content of different litters of stands, and analyzed the probability of forest fire according to the extinction moisture content. The results showed that: 1) The moisture content of different fuel types was different from the impact of rainfall, and 3 different rainfalls had different influences on the moisture content of the fuel. After-rainfall attenuation rate of the moisture content of different fuel types has the difference. 2) The moisture content of the 6 types of fuel showed extremely significant positive correlation with the relative humidity of the air, and extremely significant negative correlation with the average wind speed. 3) The leaf litters extinction moisture content of *Quercus acutissima* forest and *Pinus tabulaeformis* forest were 16.62% and 23.23%. The rainfall caused the increase of moisture content of litters. In a certain period of time after rainfall, the moisture content of litters is higher than its extinction moisture content. But with the end of rainfall, the moisture content of litters decreased, and gradually became lower than its extinction moisture content.

Key words: surface dead fuel; moisture content; rainfall; meteorological factor

森林火灾对森林的影响是深远和深刻的,不仅严重影响着森林生态系统,而且严重威胁着人民的生命财产安全^[1]。森林火灾的发生具有随机性,是多种因素作用的偶然结果,但也具有其内在的规律性。可燃物含水率与森林火灾的发生具有密切的关系,决定了森林被点燃的难易程度,是林火发生的重要因子^[2-7]。森林可燃物含水率是由各项气象因子综合作用决定的^[7-14],其中降水是影响可燃物含水率的一个重要的气象因子,降水包括雨、雪、露、冰雹、霜和雾等形式。降水同时增加了土壤含水率,降低森林火险。一般情况下,降水量<5 mm时,对林火的发生和发展有利;降水量>5 mm时,对林火发生发展有抑制作用^[15]。降水量较少或没有时,空气干燥,相对湿度减低,可燃物含水率减小,森林火险增大。目前,针对降水对可燃物含水率的研究主要是把降水作为多个气象因子其中的一个因子,采用气象要素回归法^[16-17],利用长期、大量的森林可燃物含水率和同期气象数据,进行多元统计回归,建立可燃物含水率与气象关系模型,两者拟合关系效果好^[18-22],国内有代表性的研究工作有居恩德^[23]等进行了可燃物含水率与气象要素相关性的研究,王瑞君^[24]采用美国著名林学家 Forsberg 于 1970 年提出的相对湿度理论进行了死可燃物含水量模型的研究,进行了云南松可燃物含水量动态的研究,徐丽华^[25]用线性回归分析方法,找到了活可燃物含水率

与取样时间的函数关系,建立了活可燃物含水率动态模型。由于林冠层对降雨的影响,降雨在不同的森林中对可燃物的影响也不同。针对森林可燃物含水率受降水影响的分析及其变化规律的研究鲜有报道。以山东省莱芜市香山地区主要森林类型地表可燃物为研究对象,测定了春季防火期内地表死可燃物的含水率,分析了 3 次降雨对不同地表死可燃物含水率的影响,测定了不同枯落叶类型的熄灭含水率,结合熄灭含水率分析了雨后不同林分的火险情况,根据野外观测的气象数据,分析了可燃物含水率与部分气象因子的相关性,对鲁东低山丘陵地区森林防火工作有一定指导意义。

1 研究区概况

莱芜香山坐落于莱芜西北部,系鲁中南山地,属泰山支脉,西南部与泰山相望,西北部与章丘市垛庄山区相连,东部与华山森林公园相接。地理坐标 117°22′—117°33′E、36°22′—36°28′N。有大小山峰 96 座,其中海拔 700 m 以上的 25 座,250~700 m 的 71 座,主峰海拔 918 m,为莱芜第 2 大高峰。总面积 4 754 hm²,森林覆盖率为 80% 以上。香山属于暖温带大陆性季风气候区,雨热同期,四季分明,干湿明显。年平均降水为 800 mm,其中雨季约占 65%。全年平均气温为 2.5℃。无霜期 110 d 左右。山地小气候特征明显,夏季气温比莱芜市区约低 5~8℃。

表 1 2 种林分林分特征

Table 1 Stand characteristics of two types of forest

林分类型	树种组成	林分类型	林龄/年	密度/(株·hm ⁻²)	海拔/m	平均树高/m	平均胸径/cm	郁闭度	坡向	坡度/(°)	坡位	凋落物层厚度/cm
油松林	油松	人工林	35	600+	348	7.3	15.2	45%	阳坡	30	下坡	5.1
麻栎林	麻栎	人工林	36	200+	368	9.0	20.0	30%	阳坡	30	下坡	7.2

每年的 3、4 月份,尤其是 4 月上旬,是香山防火工作最重要的时段,油松林和麻栎林是香山地区的 2 种主要森林类型,主要分布于香山的阳坡地带。

油松林和麻栎林的分布均具有连续性,油松林分布于海拔 700 m 以下,平均林龄 30~50 a,麻栎林分布于海拔 250~600 m,平均林龄 35~55 a。由于香山

林区严格的保护措施,加上人为活动较少,使林地和植物群落受影响较少,2 种林分内地表凋落物基本保持原始状态,并且林内地表凋落物载量较高,火险等级高。进入 3 月下旬,选择有代表性的 2 种林分油松林和麻栎林为研究对象,进行凋落物含水率观测,所调查林分林分特征如表 1。

2 材料与方法

2.1 可燃物含水率观测

于 2015 年 3 月中旬,挑选低海拔林区具有代表性的油松、麻栎林,选择每个林地的中心地带,随机设置 5 个取样地点,用于进行地表死可燃物含水率的测定。取样时间为每天 14:00,每次取样重量约为 50 g,装入已知重量的标准干信封内,现场称湿重,之后带回实验室在 105℃ 下烘干至恒重,称干重。在样地附近开阔地带分别放置 TE525 雨量筒,观测降雨量,降雨当天在降雨停止后立即采样。并在林内用 YF-Z3 型小气候仪观测每天温度、湿度、风速等气象因子。在 2 个森林类型内,经过勘查后确定的,用于观测的地表凋落物绝对含水率可燃物种类为地表枯落叶、1 h 枯枝、10 h 枯枝。枯草、100 h 枯枝和 1 000 h 枯枝在 2 个林型种极少或者不存在,所以,不对其进行观测。

可燃物含水率计算方法:

$$M=(W_1-W_2)/(W_2-m) \tag{1}$$

式中, M 为可燃物含水率; W_1 为可燃物和标准干信封总湿重; W_2 为可燃物和标准干信封总干重; m 为标准干信封质量。

2.2 可燃物熄灭含水率测定

可燃物熄灭含水率,是指可燃物点燃后能连续蔓延的上限含水率。分别在 2 种林型内的中心地段,划分小样方,面积为 50 cm×50 cm,将小样方内地表枯落叶装入塑料袋内,带回实验室。将所取样本浸入水中,保证枯落叶全部没入水中,浸水时间为 24 h。24 h 后,枯落叶吸水基本上达到饱和状态,之后,取出枯落叶。

在室外选择 1 块裸露空地,能见阳光,通风良好。将浸水的枯落叶放置到燃烧床上,进行晾晒,晾晒过程中枯落叶摆成自然状态下的厚度,每隔 5 min 用火柴点燃一下枯落叶,并且每次点燃后翻转可燃物,使其均匀失水,至能够点燃枯落叶并且火焰可以蔓延,分别将枯落叶分 3 份装入烘干后的标准干信封中,称湿重。带回实验室,在 105℃ 下烘干至恒重,称干重。由式(1)计算样品熄灭含水率^[26-27]。

2.3 数据处理

作图采用 EXCEL2010 软件,利用降雨后当天

与第 3 天可燃物含水率计算可燃物雨后含水率衰减率,并绘制成图。运用 SPSS21.0 软件对数据进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 降雨对可燃物含水率的影响

研究时段内 3 次降雨基本情况如下:第 1 次降雨发生在 2015 年 3 月 16 日 21:00 至次日 7:00 左右,降雨量为 8.5 mm,属于小雨;第 2 次降雨发生在 2015 年 4 月 2 日 13:00 至 3 日 10:00,此次降雨为中雨强度,降雨量为 19.8 mm;第 3 次降雨发生在 2015 年 4 月 12 号 11:00—14:00,此次降雨属于阵性强降雨,降雨量为 22.5 mm。从图 1、图 2 可看出,不同可燃物类型含水率受降雨影响程度具有差异性,3 次不同的降雨对可燃物含水率影响程度具有差异性,并且所调查可燃物含水率均在降雨后显著升高,降雨结束后下降。

3.1.1 不同可燃物类型含水率受降雨影响分析 2 种林分地表枯落叶、1 h 枯枝、10 h 枯枝含水率受降雨影响各不相同。由图 1 可知,麻栎林内,不同地表可燃物含水率 3 次降雨前均表现为 10 h 枯枝>1 h 枯枝>枯落叶,降雨后均表现为枯落叶>10 h 枯枝>1 h 枯枝,可看出降雨前枯落叶含水率最低,而降雨后其变为最高,在 3 次降雨中变异率均为最大,降雨前后可燃物含水率变异率表现为:枯落叶>10 h 枯枝>1 h 枯枝(图 3)。这是因为麻栎枯落叶是长椭圆形,叶面积大,质地疏松,容易吸水,故其含水率高,对于枯枝而言,随着枯枝直径增大,其表面积也随着增大,可吸水面积增加,持水能力增加,故 10 h 枯枝含水率较 1 h 枯枝含水率高。由图 2 可知,油松林内,不同地表可燃物含水率 3 次降雨前均表现为:10 h 枯枝>枯落叶>1 h 枯枝,降雨后均表现为:10 h 枯枝>1 h 枯枝>枯落叶,可看出降雨前枯落叶含水率高于 1 h 含水率,而降雨后枯落叶含水率低于 1 h 含水率,降雨前后 10 h 枯枝含水率均为最高,从变异率来看,油松林内可燃物含水率降雨前后变异率表现为:10 h 枯枝>1 h 枯枝>枯落叶(图 3)。这是因为油松林枯落叶是圆柱形,质地紧密,可看成为比 1 h 枯枝直径还小的枝条,表面积很小,比枯枝更难吸水,故其含水率低。

3.1.2 不同降雨强度对可燃物含水率的影响分析

第 1 次降雨属于小雨级别,降雨量较小。结合图 3 可看出,可燃物含水率在此次降雨前后的变异率均比其余 2 次降雨小,所以相对于其余 2 次降雨来说,此次降雨对可燃物含水率的影响小。第 2 次降雨属于中雨级别,在此 3 次降雨中降雨量较大,降雨

持续时间最长,结合图 3 可知,可燃物含水率在此次降雨前后的变异率均比其余 2 次降雨大,所以相对于其余 2 次降雨来说,此次降雨对可燃物含水率的影响大。第 3 次降雨属于阵性强降雨,降雨量较大,在此 3 次降雨中降雨量最大,但降雨时间短。结合图 3 可知,可燃物含水率在此次降雨前后的变异率介于其余 2 次降雨之间,所以此次降雨对可燃物含水率的影响强度属中等。

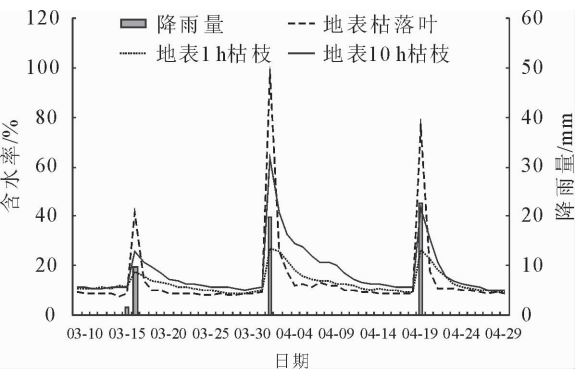


图 1 麻栎林可燃物含水率变化曲线

Fig. 1 The change curve of *Q. acutissima* forest fuel moisture

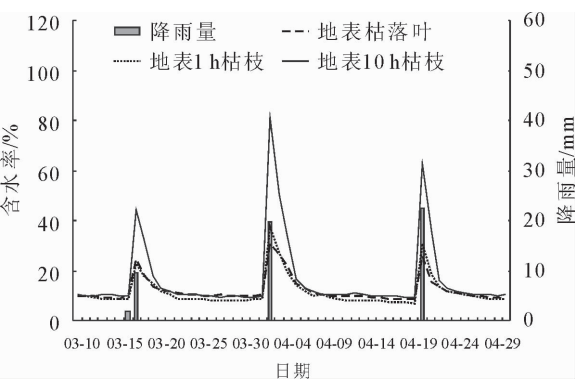


图 2 油松林可燃物含水率变化曲线

Fig. 2 The change curve of *P. tabulaeformis* forest fuel moisture

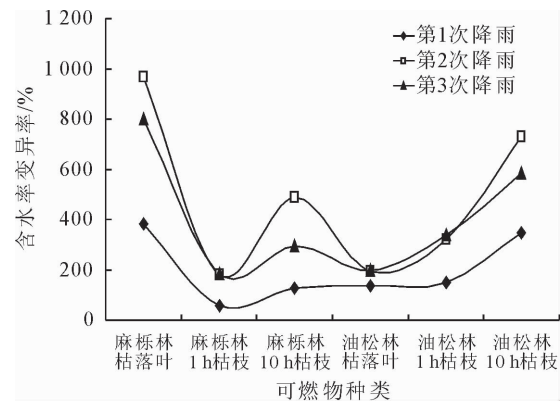


图 3 可燃物含水率降雨前后变异率

Fig. 3 Rate variation of fuel moisture for rainfall

3.1.3 不同可燃物类型含水率雨后衰减率分析

由图 4 可知,不同可燃物在降雨后 3 d 含水率衰减率不同,麻栎林内,可燃物含水率 3 次降雨后衰减率绝对值均表现为枯落叶>10 h 枯枝>1 h 枯枝;油

松林内,可燃物含水率第 1 次降雨后衰减率绝对值表现为 10 h 枯枝>枯落叶>1 h 枯枝,其余 2 次均表现为 10 h 枯枝>1 h 枯枝>枯落叶,第 1 次降雨结果可能有误差所致。

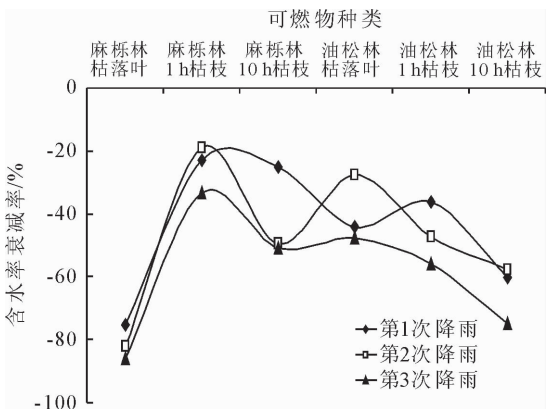


图 4 可燃物含水率降雨后衰减率

Fig. 4 Attenuation rate of moisture content of fuel after rainfall

3.2 主要森林类型地表可燃物含水率的影响因子分析

森林中可燃物含水率受外界环境因子影响很大,如相对湿度、温度、风等^[16,28]。空气相对湿度影响林内可燃物含水率蒸发速度,空气相对湿度较小时,林内可燃物就会加快蒸发,可燃物含水率降低,森林火险较大;相反的,可燃物含水率变化较小,森林火险也较小。空气温度影响着可燃物自身水分蒸发和扩散,气温越高,相对湿度越低,水分蒸发和扩散越快,可燃物含水率随之减小。风一般作为间接因子影响可燃物含水率,不但能降低空气湿度,而且还加速了可燃物表面水分蒸发。

由图 5A、图 5B 可看出,2 种林分内空气相对湿度受降雨影响显著,在降雨当天显著增大;降雨结束后,随着雨后天数增加,空气相对湿度逐渐减小。这与地表可燃物含水率变化规律一致。相关分析结果表明,麻栎林、油松林林内地表可燃物含水率与空气相对湿度均达到极显著正相关($P<0.01$)。

由图 5C、图 5D 可看出,林分内温度在降雨期间显著降低,降雨结束后,随着雨后天数增加,温度有波动,但整体呈上升趋势。相关分析结果表明,麻栎林、油松林林内地表可燃物含水率与温度均呈负相关性,但是均没有达到显著水平($P>0.05$),相关系数在 $-0.182\sim-0.076$ 之间。这是因为该地区在调查时间段受不同气流(暖气流、冷气流)影响频繁,温度波动较剧烈,随机性较大。

由图 5E、图 5F 可看出,林分内风速受降雨影响显著,在降雨期间风速较低,雨后呈增大趋势。相关分析结果表明,2 种林分内地表可燃物含水率与林内风速均达到极显著负相关($P<0.01$),这说明风速对可燃物含水率影响显著。

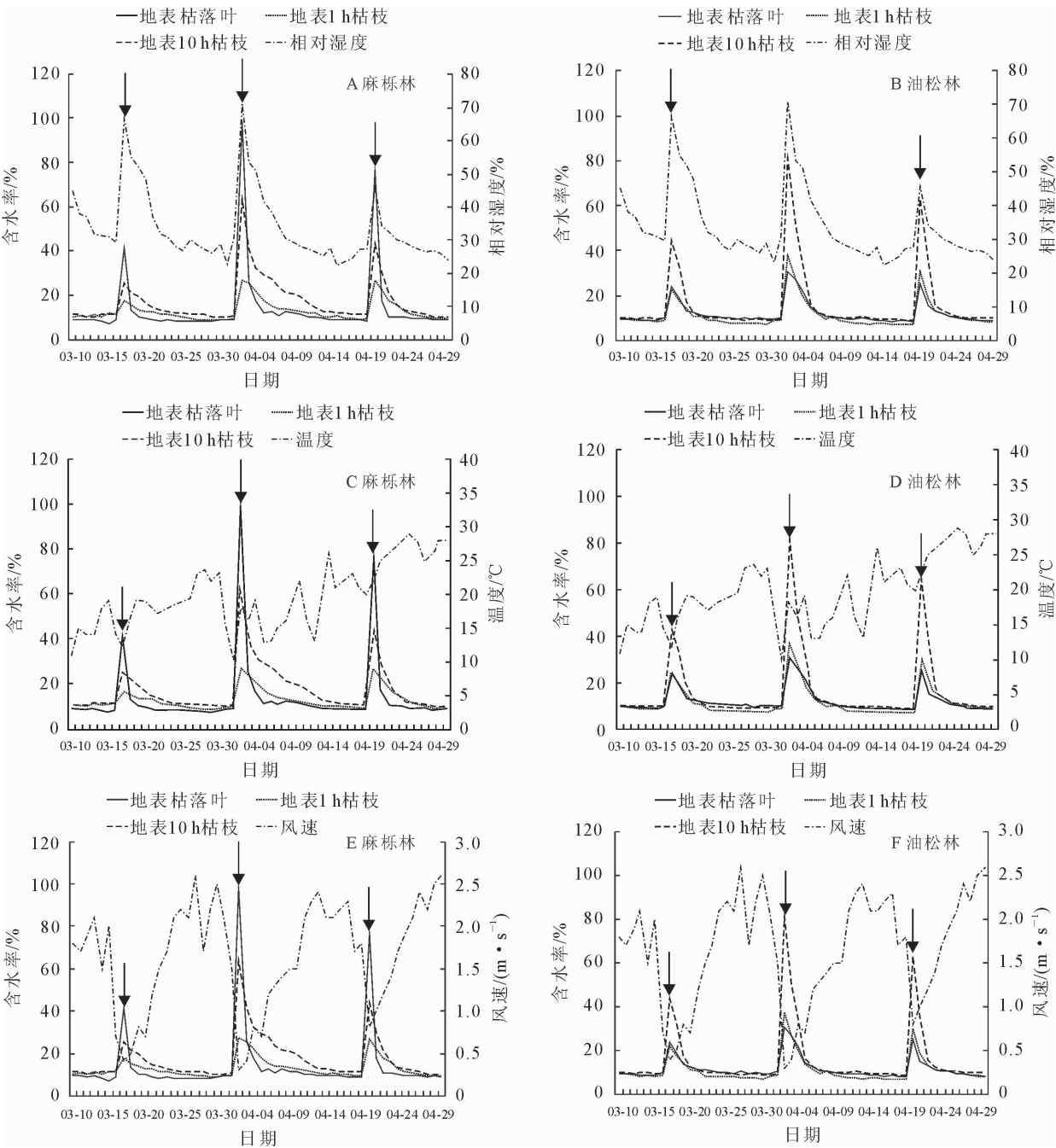


图5 主要气象因子与森林可燃物含水率相关曲线(图中箭头处代表降雨时,下同)

Fig.5 Correlation curve of main meteorological factors and water content of forest fuel

3.3 可燃物熄灭含水率及雨后可燃物含水率变化分析

所调查2种林分地表枯落物的主要组成部分为枯落叶,地表枯落叶可认为是这2种林分森林火灾的引火物,其含水率决定发生火灾的可能性大小。熄灭含水率是可燃物能够点燃并且继续燃烧的上限含水率,当可燃物含水率低于熄灭含水率时,可燃物可以燃烧,有火灾危险;当可燃物含水率高于熄灭含水率时,可燃物不能燃烧,无火灾危险。由表2可看出,麻栎枯落叶、油松枯落叶熄灭含水率分别为16.62%、23.23%。

表2 2种枯落叶熄灭含水率

Table 2 The extinction moisture content of different litter of stands

可燃物类型	熄灭含水率/%
麻栎枯落叶	16.62
油松枯落叶	23.23

由图6可看出,从调查开始至第1次降雨前,麻栎林内枯落叶含水率均低于熄灭含水率,林内地表有发生火灾的危险。第1次降雨后,林内枯落叶含水率升高,达到41.34%,高于熄灭含水率,所以此时林内无发生火灾的危险;随着降雨结束,枯落叶含

水率降低,在降雨后第 2 天至下次降雨前,均低于熄灭含水率,故此期间林内有发生火灾的危险。第 2 次降雨使麻栎林枯落叶含水率升高较大,雨后达到 98.08%,此次降雨后 3 d 内,含水率均高于熄灭含水率,第 4 天至下次降雨前,均低于熄灭含水率。第 3 次降雨,在雨后第 1 天至第 2 天,林内枯落叶含水率均高于熄灭含水率,雨后第 3 天至调查结束,均低于熄灭含水率。

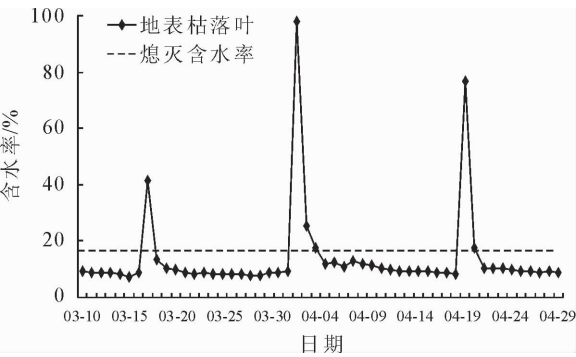


图 6 麻栎林地表枯落叶含水率与熄灭含水率关系

Fig. 6 The relationship between *Q. acutissima* forest surface litter moisture and extinguishing water content

由图 7 可看出,从调查开始至第 1 次降雨前,油松林内枯落叶含水率均低于熄灭含水率。第 1 次降雨后,林内枯落叶含水率略高于熄灭含水率,雨后第 2 天至下次降雨前,均低于熄灭含水率。第 2 次降雨后,在雨后第 1 天至第 2 天,枯落叶含水率均高于熄灭含水率,雨后第 3 天至下次降雨前,均低于熄灭含水率。第 3 次降雨后,在雨后第 1 天高于熄灭含水率,雨后第 2 天至调查结束,均低于熄灭含水率。

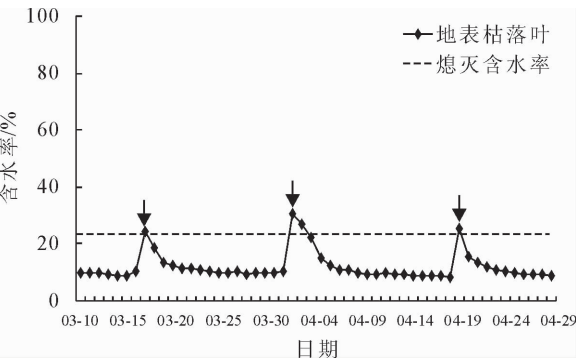


图 7 油松林地表枯落叶含水率与熄灭含水率关系

Fig. 7 The relationship between *P. tabulaeformis* forest surface litter moisture and extinguishing water content

4 结论

1)不同可燃物类型含水率受降雨影响具有差异性。麻栎林内,降雨前后可燃物含水率变异率表现为:枯落叶>10 h 枯枝>1 h 枯枝,这是因为麻栎枯落叶是长椭圆形,叶面积大,质地疏松,容易吸水,故其含水率高,对于枯枝而言,随着枯枝直径增大,其

表面积也随着增大,可吸水面积增加,持水能力增加,故 10 h 枯枝含水率较 1 h 枯枝含水率高。油松林内表现为:10 h 枯枝>1 h 枯枝>枯落叶,这是因为油松林枯落叶是圆柱形,质地紧密,可看成为比 1 h 枯枝直径还小的枝条,表面积很小,比枯枝更难吸水,故其含水率低。3 次不同的降雨对可燃物含水率影响具有差异性,第 1 次降雨对可燃物含水率影响较小,第 2 次降雨较大,第 3 次降雨中等。这是因为第 1 次降雨属于小雨级别,降雨量小,降雨时间也较短,所以对可燃物含水率影响较小。而第 2 次降雨属于中雨级别,降雨量较大,降雨持续时间也较长,所以对可燃物含水率影响较大。第 3 次降雨属于阵性强降雨,虽然降雨量大于第 2 次降雨,但是降雨时间较短,所以对可燃物含水率影响程度小于第 2 次降雨。不同可燃物类型含水率雨后衰减率具有差异性,麻栎林内,可燃物含水率 3 次降雨后衰减率绝对值均表现为枯落叶>10 h 枯枝>1 h 枯枝;油松林内表现为 10 h 枯枝>1 h 枯枝>枯落叶。

2)所调查 6 种可燃物类型含水率与空气相对湿度均呈极显著正相关,与林内空气温度呈负相关,但未达到显著水平,与林内平均风速呈极显著负相关。

3)麻栎、油松枯落叶熄灭含水率分别为 16.62%、23.23%。降雨导致麻栎林、油松林地表枯落叶含水率增大,在雨后一定时间内,枯落叶含水率高于熄灭含水率,此时,林内无火灾危险;但随着降雨结束,雨后天数的增加,林内枯落叶含水率降低,当低于熄灭含水率时,林内开始有火灾危险。

5 讨论

以往针对可燃物含水率的研究,主要集中在对可燃物含水率进行长期观测并建立相关模型^[16-24],本研究重点分析了降雨对不同可燃物类型含水率的影响,并且分析了部分气象因子与可燃物含水率的关系,更加有利于了解降雨对不同可燃物含水率的影响及可燃物含水率的变化规律。以往针对地表凋落物含水率的研究没有对凋落物进行系统的分类,把地表凋落物看作一个整体,而枯落物的组成成分性质不同,其含水率变化规律也不同。地表枯落叶是森林火灾发生的引火物,其含水率变化规律与枯枝不同,一般情况下,枯落叶更易失水,含水率降低更加迅速,当枯落物总体含水率较高时,不能说明枯落叶含水率也在较高水平。所以本文将地表凋落物分为枯落叶、1 h 枯枝和 10 h 枯枝,分别对其含水率进行观测和分析,有利于了解不同地表死可燃物含水率的变化规律,并且可以结合枯落叶含水率来分析森林地表可燃物的火险情况。本研究只分析了 3

次特定降水对不同可燃物含水率的影响,而不同降雨量与不同降雨延续时间对可燃物含水率影响不同,有关这方面规律有待深入探究。本研究只分析了部分气象因子与可燃物含水率的相关性,其他因素比如地形因子(坡度、坡向和坡位、海拔等)和林分因子(郁闭度、林龄等)也对降雨后可燃物含水率变化有影响,这方面内容有待系统研究。

参考文献:

[1] 高瑞平. 澳大利亚森林火灾的管理与火生态的研究[J]. 应用生态学报,1994,5(4):409-414.
GAO R P. Management of forest fire in Australia and fire ecology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, 5(4): 409-414. (in Chinese)

[2] 胡海清. 大兴安岭主要森林可燃物理化性质测定与分析[J]. 森林防火,1995(1):27-31.

[3] STEPHEN J P,PATRICIA L A,RICHARD D L,*et al.* Introduction to wild-fire [M]. New York:John Wiley & Sons Inc, 1996.

[4] 何忠秋,李长胜,张成钢,等. 森林可燃物含水量模型的研究[J]. 森林防火,1995(2):15-16.

[5] 何忠秋,张成钢,牛永杰. 森林可燃物湿度研究综述[J]. 世界林业研究,1996,9(5):26-30.

[6] 舒立福,张小罗,戴兴安,等. 林火研究综述(Ⅱ)[J]. 世界林业研究,2003,16(4):34-37.

[7] 薛家翠,望胜玲,曾祥福,等. 鄂西林地可燃物含水率及火险等级的气象预报研究[J]. 华中农业大学学报,2006,25(6):679-682.
XUE J C,WANG S L,ZENG X F,*et al.* Meteorological prediction of the forest fuel moisture and fire danger ratings[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2006, 25(6): 679-682. (in Chinese)

[8] 卢欣艳,牛树奎,任云卯. 北京西山林场可燃物含水率与气象要素关系[J]. 林业资源管理,2010(3):79-86.

[9] 王晓红,张吉利,金森. 林火蔓延模拟的研究进展[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(10):69-78.
WANG X H,ZHANG J L,JIN S. Research progress of forest fire spreading simulation[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2013,33(10):69-78. (in Chinese)

[10] 贾鹏超,曲智林,马普龙. 基于时间序列分析的可燃物含水率预测模型[J]. 东北林业大学学报,2013,41(5):157-158.
JIA P C,QU Z L,MA P L. Prediction model of forest fuel moisture based on time series analysis[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013,41(5):157-158. (in Chinese)

[11] 孙萍,李大伟. 10 种国内森林火险计算方法的相似性研究[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(5):17-21.
SUN P,LI D W. Study on similarity of calculation methods of 10 Chinese forests fire danger rating[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2013,33(5): 17-21. (in Chinese)

[12] 王金叶,车克均,傅辉恩. 可燃物含水率与气象要素相关性研究[J]. 甘肃林业科技,1994(2):21-23.

[13] 罗永忠,车克均,蒋志荣. 祁连山林区森林可燃物含水率变化规律研究[J]. 甘肃农业大学学报,2005(4):239-244.

LUO Y Z,CHE K J,JIANG Z R. Studies on the changing pattern of forest fuel moisture[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2005(4):239-244. (in Chinese)

[14] DEEMING J E,LANCASTER J W,FOSBERG M A,*et al.* The national fire-danger rating system[R]. USA. Department of Agriculture,Forest Service,1972:165-176.

[15] 陈天锡,陈卫波. 森林火灾与气象条件的关系及其预报和防御[J]. 河南气象,2000(4):25-26.

[16] 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.

[17] 张国防,林文革,花昆福,等. 杉木人工林地表易燃物含水率变化规律[J]. 福建林学院学报,2000,20(1):76-78.
ZHANG G F,LIN W G,HUA K F,*et al.* Study on the moisture change of surface easy fuel of Chinese fir plantation[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2000,20(1):76-78. (in Chinese)

[18] 顾香凤,段秀英,崔亚非,等. 死可燃物含水量变化规律[J]. 林业科技,1995,20(2):44-46.

[19] 田年军,宋卫东,召义发,等. 长白山区森林可燃物含水率分布规律的研究[J]. 吉林林业科技,1997,128(3):5-10.

[20] 覃先林,张子辉,易浩若,等. 一种预测森林可燃物含水率的方法[J]. 火灾科学,2001,10(3):159-162.

[21] 罗永忠,车克均,蒋志荣. 祁连山林区森林可燃物含水率变化规律研究[J]. 甘肃农业大学学报,2005,40(2):239-244.
LUO Y Z,CHE K J,JIANG Z R. Studies on the changing pattern of forest fuel moisture[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2005(4):239-244. (in Chinese)

[22] 王得祥,徐钊,张景群,等. 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(1):35-39.
WANG D X,XU Z,ZHANG J Q,*et al.* Relationships between climatic factors and water content of fire fuels[J]. Journal of Northwest Forestry University, 1996,11(1):35-39. (in Chinese)

[23] 居恩德,陈贵荣,王瑞君. 可燃物含水率与气象要素相关性的研究[J]. 森林防火,1993(1):17-21.

[24] 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(2):16-17.

[25] 徐丽华. 地被可燃物与林型火险等级划分[J]. 辽宁林业科技, 2001(6):3-6.

[26] 胡海清,刘菲. 30 种树叶的点燃含水率与蔓延含水率[J]. 林业科学,2006,42(11):81-86.
HU H Q,LIU F. The ignition moisture content and spread moisture content for leaves of 30 tree species[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006,42(11):81-86. (in Chinese)

[27] 单延龙,刘乃安,胡海清,等. 凉水自然保护区主要可燃物类型凋落物层的含水率[J]. 东北林业大学学报,2005,33(5):41-43.
SHAN Y L,LIU N A,HU H Q,*et al.* Moisture content of litter of principal fuel types in Liangshui Nature Reserve[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2005,33(5):41-43. (in Chinese)

[28] 高国平,魏振宏,祁金玉,等. 温度对细小可燃物平衡含水率和时滞的影响[J]. 西北林学院学报,2010(4):110-114,119.
GAO G P,WEI Z H,QI J Y,*et al.* Influence of temperature on equilibrium moisture content and timelag of fine fuels[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010(4):110-114, 119. (in Chinese)