

油松人工林重度火烧后凋落物分解及水文效应

邱聪^{1,2}, 秦倩倩^{1,2}, 郑大桢³, 刘艳红^{1,2}

(1.北京林业大学生态与自然保护学院,北京 100083;

2.北京林业大学森林资源生态系统过程北京市重点实验室,北京 100083;3.北京林业大学林学院,北京 100083)

摘要:以北京市重度火烧迹地油松人工林为对象,基于原位采样法和室内浸泡法于2020年7—12月在对照样地和火烧样地采集凋落物样品并测定分析其现存量、持水量、有效拦蓄量等指标,探究林火干扰下凋落物的分解及水文效应,为更好促进森林水源涵养功能以及水土保持功能提供依据。结果表明:(1)油松人工林半分解层和完全分解层凋落物平均现存量分别为16.18(叶占比>80%),31.88 t/hm²,平均厚度分别为2.77,2.79 cm;与对照相比,火烧后半分解层凋落物厚度及现存量分别降低39.35%,53.77%。(2)油松人工林半分解层凋落物平均自然含水率(41.94%)略高于完全分解层(36.07%),平均最大持水率为201.88%,其在7—9月低于完全分解层,10—12月则反之;半分解层凋落物平均最大持水量和有效拦蓄量分别为35.80,19.85 t/hm²,在8—12月均显著($P<0.05$)低于完全分解层(69.28,46.64 t/hm²)。与对照样地相比,火烧后半分解层凋落物自然含水率降低32.19%,最大持水率和最大持水量分别降低13.36%,60.05%,有效拦蓄量降低了62.47%。(3)在24 h浸水过程中,7—9月对照样地半分解层凋落物持水量、吸水速率小于完全分解层,10—12月则反之;火烧后,半分解层凋落物持水量、吸水速率较对照样地半分解层凋落物减少。综上,油松人工林凋落物(半分解层)分解表现为先快后慢,火烧后其分解加速;凋落物持水性能及持水过程主要呈现完全分解层>半分解层,未火烧>重度火烧,即凋落物水文效应受分解阶段和火烧干扰影响。

关键词:林火;油松;凋落物;水文效应

中图分类号:S715

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)01-0196-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.01.026

Litter Decomposition and Hydrological Effects in *Pinus tabulaeformis* Plantation After Severe Burning

QIU Cong^{1,2}, QIN Qianqian^{1,2}, ZHENG Dacheng³, LIU Yanhong^{1,2}

(1.School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Beijing Key Laboratory of Forest Resources and Ecosystem Processes, Beijing Forestry

University, Beijing 100083;3. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: The *Pinus tabulaeformis* plantation of severely burned areas in Beijing was taken as the research object, based on in situ sampling method and indoor immersion method, litter samples were collected in control plot and burned plot from July 2020 to December 2020 and their standing crops, water holding capacity and effective retention were measured and analyzed to explore the decomposition and hydrological effects of litter under the interference of forest fire. It could provide a basis for giving better exerting the function of forest water conservation and soil and water conservation. The results showed that: (1) The average standing crop of litter in semi-decomposed layer and decomposed layer of *Pinus tabulaeformis* plantation were 16.18 t/hm² (leaves proportion > 80%) and 31.88 t/hm², the average thickness were 2.77, 2.79 cm, respectively. Compared with the control plot, the litter thickness and standing crop of the semi-decomposed layer after fire were decreased by 39.35% and 53.77% respectively. (2) The average natural moisture content of litter in semi-decomposed layer (41.94%) was slightly higher than that in decomposed layer (36.07%) in *Pinus tabulaeformis* plantation, and the average maximum water holding capacity was 201.88%, which was lower than that of decomposed layer from July to September, and vice versa from October to December. The

收稿日期:2021-08-13

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504004)

第一作者:邱聪(1996—),女,硕士研究生,主要从事恢复生态研究。E-mail:993161011@qq.com

通信作者:刘艳红(1965—),女,教授,主要从事恢复生态研究。E-mail:liuyh@bjfu.edu.cn

average maximum water holding capacity and effective retention in semi-decomposed layer were 35.80, 19.85 t/hm², which were significantly ($P < 0.05$) lower than those of decomposed layer from August to December (69.28, 46.64 t/hm²). Compared with the control plot, the natural moisture content, maximum water holding rate, maximum water holding capacity and the effective retention of litter in semi-decomposed layer after fire were decreased by 32.19%, 13.36%, 60.05% and 62.47% respectively. (3) In the 24-hour immersion process, the litter water holding capacity and water absorption rate in semi-decomposed layer were lower than those of decomposed layer from July to September, and vice versa from October to December. The water holding capacity and water absorption rate of litter after fire in semi-decomposed layer were lower than those in control plot. In conclusion, the decomposition of litter (semi-decomposed layer) in *Pinus tabulaeformis* plantation was first fast and then slow, and the decomposition was accelerated after burning. The indexes of water holding capacity and water holding processes of litter mainly showed that decomposed layer was higher than semi-decomposed layer, and non-burned was higher than severe burned, that is, the hydrological effects of litter was affected by the decomposition stage and burning.

Keywords: forest fire; *Pinus tabulaeformis*; litter; hydrological effects

凋落物层通常由直径 <2.5 cm 的乔灌木的枯枝落叶、落皮和花果及林下枯死的草本等植物组织构成^[1],拥有巨大的表面积和松散的内部结构,具备良好的透水性和吸水性^[2-3],是森林水文效应的第 2 作用层,与林冠层和土壤层共同构成了森林生态系统水源涵养的 3 个垂直层次^[4],在有效拦截降雨、减轻土壤冲蚀,以及拦蓄地表径流、增加土壤水分入渗等方面发挥主导作用,具有涵养水源和水土保持、提升水文生态功能、优化生态系统服务等功能效应^[5]。凋落物的分解状况及构成能综合反映出森林生境条件和系统发育程度^[6-7],而不同分解层的生态功能尤其是水文效应差异显著^[8-9]。

林火是森林生态系统重要的干扰因子之一^[10],多发生在环境干燥和凋落物大量堆积的条件下^[11],在全球气候变暖的背景下,林火发生的频率和强度逐渐增加,这将影响森林生态系统的演替和发展^[12-13]。在重度火烧迹地,乔木熏黑高度 >5 cm 且存活率在 30% 以下,林下灌草以及凋落物层基本被烧毁^[14]。火后初期森林原生境被改变,林分郁闭度下降,光照和空气流通加强,土壤温度升高,此外降水对土壤的冲刷和淋溶等生态过程共同导致地表径流和土壤表层侵蚀增加,仅有灌草等林下植被恢复,凋落物层厚度及蓄积量较低^[15]。随着火后恢复年限增加,森林结构趋于完整,林分郁闭度增加^[16-17]。韩雪成等^[18]认为,随着恢复年限的增加,凋落物的积累量、厚度不断增加,火后 20 年林地凋落物的最大持水量(率)可达到火烧前水平。王丽红等^[6]研究发现,大兴安岭重度火烧迹地凋落物半分解和完全分解层的最大持水量也随恢复年限的增加而增大。凋落物的分解及水文效应受到外界环境因子以及凋落物自身质量等的综合影响。已有研究^[19-20]多涉及森林类型、林龄、采

伐以及全球变化等方面,对于火烧后初期凋落物的分解以及水文效应鲜有报道。

油松(*Pinus tabulaeformis*)作为北方地区最主要造林和水土保持针叶树种之一,其枝叶中含有易燃的油脂有机化合物,极易引发重度火灾,大大降低了森林生态系统涵养水源的能力。本研究以北京市重度火烧迹地油松人工林为对象,通过测定凋落物现存量、分解速率、持水量、持水率以及有效拦蓄量等,分析林火干扰下凋落物分解过程中的水文效应,为进一步探讨森林生态系统中的水分循环和水量平衡奠定基础,同时为该地区森林经营管理、水源涵养和水土保持提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于北京市密云、平谷区的交界处(116°58'00"E,40°17'00"N),是北京市著名的生态涵养区和重要的饮用水源基地,区域内有错河水系分布。该地区属暖温带半湿润大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,四季分明,年温差较大。年平均降水量 642 mm,年平均气温 11.2 °C,从 11 月至翌年 2 月多西北风。土壤类型以山地棕壤为主,土壤颗粒组成多为粉砂。地形以山地和低山丘陵为主,约占总面积的 79.5%。研究区林木覆盖率较高,拥有华北地区最大的人工油松林,林分密度为 725 株/hm²,属中林龄。乔木主要有油松(*Pinus tabulaeformis*),其作为优势种分布面积较广,其次还分布有少量的槲树(*Quercus dentata*)、麻栎(*Quercus acutissima*)以及臭椿(*Ailanthus altissima*)等;灌木主要有扁担杆(*Grewia biloba*)、多花胡枝子(*Lespedeza floribunda*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、小叶鼠李(*Rhamnus*

parvifolia)以及荆条(*Vitex negundo*);草本主要有茜草(*Rubia cordifolia*)、青绿藎草(*Carex breviculmis*)、狗尾草(*Setaria viridis*)以及求米草(*Oplismenus undulatifolius*)等。

1.2 样地设置

研究区于 2019 年 3 月 30 日发生山火,由于风势较大,火情迅速由北京市密云区绵延至平谷区,总过火面积约 0.43 km²。火后自然恢复,在开展研究期间,乔木如松树没有发芽,栎树也仅有少数从根部萌发枝条,林下植被再生。研究选取北京市密云区重度火烧迹地作为试验样地,在临近未过火区域选取立地条件相似的区域作为对照样地,分别设置了 3 块面积为 30 m×30 m 的样地,共 6 块。按照五点取样法在每个样地内随机布设 5 个面积为 40 cm×40 cm 的样方,样方上部及四周用纱网进行覆盖,并用 PVC 管对四周进行支撑。

1.3 样品采集

2020 年 7—12 月,每月在每个样方内随机选取 1 个面积为 10 cm×10 cm 的小样方进行凋落物厚度测量、样品采集和称重。按照分层标准^[21-22],对照样地采集半分解层(凋落物颜色为暗褐色或褐黑色,外观不完整伴有一定程度的破碎化,但依旧可识别其特征)和完全分解层(凋落物呈黑色,外观严重破碎化,无法识别其原有结构),重度火烧迹地因凋落物于 2019 年全部烧尽,地表所覆凋落物主要来源于火烧后枯死树木、周边活立木及恢复后的灌草,无完全分解状态的凋落物,故仅采集半分解层。

1.4 凋落物持水性能测定与计算

凋落物的持水性能采用室内浸泡法^[23]测定,其中持水量(Q_h)、最大持水率($L_{h\max}$)和吸水速率(V_h)是表征凋落物持水性能的重要指标。将风干后的凋落物样品分别装入 300 目的尼龙网袋^[24],随后将其完全浸入清水中,分别浸泡 0.5,1,2,4,6,8,10,24 h 后捞起并静置至不滴水时称其质量,每个样品重复 3 次^[21]。

(1)凋落物现存量、自然含水率计算公式^[25-26]为:

$$q = \frac{m_a - m_b}{m_a} \times 100\%$$
$$M = \frac{m(1-q)}{0.01} \times 10^{-2}$$
$$R_0 = \frac{m_a - m_b}{m_b} \times 100\%$$

式中: q 为凋落物水的质量分数(%); M 为现存量(t/hm²); R_0 为凋落物自然含水率(%); m 为采集范围内所有凋落物鲜重(g); m_a 为凋落物鲜重(g); m_b 为凋落物烘干重(g)。

(2)凋落物持水量、最大持水率和吸水速率计算

公式^[27]为:

$$Q_h = \frac{m_t - m_1}{m_1} \times 1000$$
$$L_{h\max} = \frac{m_{24} - m_1}{m_1} \times 100\%$$
$$V_h = \frac{Q_h}{t}$$

式中: Q_h 为凋落物持水量(g/kg); V_h 为凋落物吸水速率(g/(kg·h)); m_t 为浸水 t 时刻时凋落物和尼龙网袋的总重(g); m_1 为浸水前凋落物和尼龙网袋的总重(g); t 为凋落物的浸水时间(h); $Q_{h\max}$ 为凋落物最大持水量(t/hm²); $L_{h\max}$ 为凋落物最大持水率(%)。

对 0~24 h 内凋落物持水量随时间变化的增长曲线进行方程拟合,发现二者符合对数关系:

$$Q_h = a \ln t + b$$

式中: Q_h 为凋落物持水量(g/kg); t 为凋落物的浸水时间(h); a 为方程系数; b 为方程常数项。

对 0~24 h 内凋落物吸水速率随时间变化的增长曲线进行方程拟合,发现二者符合幂函数关系:

$$V_h = kt^n$$

式中: V_h 为凋落物吸水速率(g/(kg·h)); t 为凋落物的浸水时间(h); k 为方程系数; n 为指数。

(3)凋落物有效拦蓄量计算公式^[18]为:

$$W_0 = (0.85L_{h\max} - R_0)M$$

式中: M 为凋落物现存量(t/hm²); W_0 为凋落物有效拦蓄量(t/hm²)。

1.5 统计分析

采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 25、SigmaPlot 14 等软件对原始数据进行处理分析并绘图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著法(LSD)检验各月份之间的差异性,对火烧以及分解阶段的差异性则采用独立样本 T 检验。

2 结果与分析

2.1 凋落物现存量及分解

油松人工林半分解层凋落物(对照样地)厚度为 2.06~3.30 cm,平均值为 2.77 cm,其中 10 月显著($P < 0.05$)低于 7—9 月;现存量范围为 13.19~22.15 t/hm²,平均值为 16.18 t/hm²,其中 7 月现存量显著高于 10—12 月;凋落物叶占比极大(81.54%~87.73%),枝次之(5.84%~13.66%),果最少(<8%),三者现存量在各月份之间均无显著性差异。完全分解层凋落物厚度(8,10 月差异显著)及现存量(8—12 月差异显著)略高于半分解层,平均厚度为 2.79 cm,10 月与其他月份差异达显著水平;平均现存量为 31.88 t/hm²,7 月显著低于 8—11 月。

与对照样地相比,重度火烧迹地半分解层凋落物

厚度(7,9 月差异显著)和现存量(9—11 月差异显著)均明显降低,厚度仅有 1.42~1.92 cm,平均值为 1.68 cm,各月之间无显著差异($P>0.05$);现存量介于 5.16~13.33 t/hm²,平均值为 7.48 t/hm²,7 月现存量显著高于 10—12 月(表 1);凋落物叶占比较对照样地高 5.42%~8.28%,枝(4%~8.81%)、果(<4%)则与之相反。重度火烧迹地 7 月半分解层凋落物叶现存量显著高于 8,10—12 月,而凋落物枝、果现存量在各月份之间无显著差异;火烧与对照样地枝、果、叶现存量分别在 9,8,7—11 月间表现出显著性差异(图 1)。

表 1 火干扰下油松人工林凋落物厚度及现存量

月份	样地	分解阶段	凋落物厚度/ cm	凋落物现存量/ (t·hm ⁻²)
7	CK	半分解层	3.30±0.55Aa	22.15±7.43Aa
		完全分解层	2.78±0.13B	20.66±6.18B
	PF	半分解层	1.42±0.52Ab	13.33±1.93Aa
		完全分解层	3.03±0.26Aa	17.78±0.80ABa
8	CK	半分解层	3.03±0.26Aa	17.78±0.80ABa
		完全分解层	2.30±0.06B*	31.63±6.59A*
	PF	半分解层	1.51±0.81Aa	7.99±3.58ABa
		完全分解层	3.06±0.42Aa	17.05±2.48ABa
9	CK	半分解层	2.60±0.24B	34.34±11.19A*
		完全分解层	1.92±0.46Ab	7.58±1.67ABb
	PF	半分解层	2.06±0.06Ba	13.61±0.58Ba
		完全分解层	3.73±0.48A*	32.64±6.28A*
10	CK	半分解层	1.71±0.59Aa	5.16±1.72Bb
		完全分解层	2.51±0.55ABa	13.19±2.13Ba
	PF	半分解层	2.51±0.55ABa	13.19±2.13Ba
		完全分解层	2.79±0.80B	41.43±12.71A*
11	CK	半分解层	1.81±0.49Aa	5.44±1.84Bb
		完全分解层	2.63±0.57ABa	13.26±4.72Ba
	PF	半分解层	2.63±0.57ABa	13.26±4.72Ba
		完全分解层	2.53±0.30B	30.57±2.72AB*
12	CK	半分解层	1.70±0.59Aa	5.34±2.89Ba
		完全分解层		

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同月份间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示对照和火烧样地间差异显著($P<0.05$);*表示对照样地半分解层和完全分解层差异显著($P<0.05$);CK 为对照样地;PF 为火烧样地。

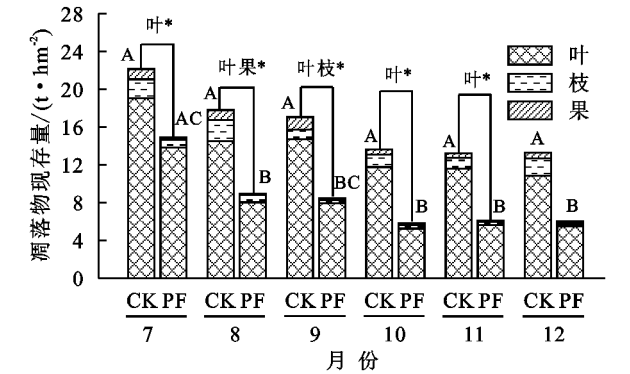


图 1 火干扰下油松人工林半分解层凋落物各组分现存量

由图 2 可知,对照样地和重度火烧迹地半分解层凋落物残留率季节波动明显,整体呈逐月下降的趋势。7—10 月凋落物残留率大幅下降,而 10—12 月其下降幅度逐渐趋于平缓。经过 6 个月的原位分解后,对照样地、重度火烧迹地凋落物半分解层的残留率分别为 59.88%,40.06%,而凋落物叶的残留率为 56.96%,39.86%。其中,对照样地、重度火烧迹地各月凋落物叶分解残留率均小于凋落物的分解残留率,凋落物各组分分解速率呈现叶>(枝+果)的规律,这说明凋落物叶相比于枝、果等更易分解。

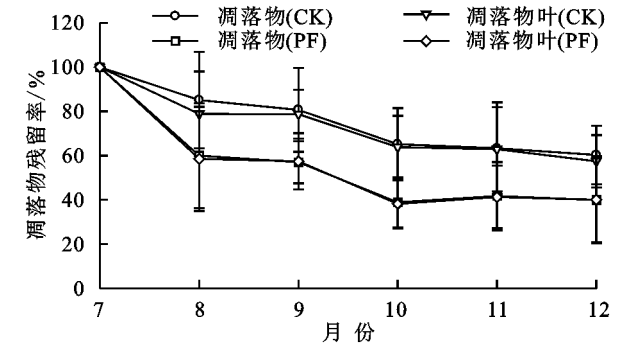


图 2 火干扰下油松人工林半分解层凋落物残留率随时间的变化

2.2 凋落物持水性能

由图 3 可知,在对照样地,半分解层凋落物最大持水量平均值为 35.80 t/hm²,逐月缓慢下降,在 7 月最大(48.75 t/hm²),12 月最小(27.26 t/hm²),且 2 个月份间差异显著;最大持水率平均值为 201.88%,随月份呈先上升后下降的趋势,7 月持水率最低(191.11%),11 月持水率最高(212.60%),各月间差异未达显著水平。完全分解层最大持水量明显高于半分解层(8—12 月差异显著),平均值为 69.28 t/hm²,其变化趋势与半分解层相反(先上升后下降),在 11 月最大(81.97 t/hm²),7 月最小(54.07 t/hm²),其中 7 月显著低于 8,9,11 月;完全分解层最大持水率略高于半分解层(11 月差异显著),平均值为 207.74%,逐月呈先快后慢下降趋势,7 月持水率最高(239.15%),12 月持水率最低(189.56%),各月间差异未达显著水平。

在重度火烧迹地,半分解层凋落物最大持水量明显低于对照样地半分解层(8—11 月差异显著),平均值为 14.30 t/hm²,逐月大致呈先快后慢下降趋势,在 7 月最大(24.62 t/hm²),10 月最小(9.72 t/hm²),其中 7 月显著高于 10—12 月;最大持水率略低于对照样地半分解层(10—11 月差异显著),平均值为 174.90%,逐月呈先上升后下降再上升的趋势,在 7 月最低(162.45%),9 月最高(191.17%),各月间差异不显著。

由图 4 可知,在对照样地,半分解层凋落物自然含水率平均值为 41.94%,逐月呈先下降后上升的变

化趋势,在 7 月最高(138.71%),10 月最低(9.87%),除 9,11 月以及 8,12 月外,其余月份之间差异均达显著水平。与半分解层相比,完全分解层自然含水率较低(8 月差异显著),平均值为 36.07%,其含水率随月份的变化趋势与半分解层保持一致,在 7 月最高(95.51%),10 月最低(10.19%),除 8,9,11 月之外,其余月份之间差异显著。在重度火烧迹地,半分解层凋落物自然含水率低于对照样地半分解层(10 月差异显著),平均值为 28.44%,其含水率随月份的变化趋势与对照样地保持一致,在 7 月最高(64.84%),10 月最低(13.06%),除 7,9,11 月以及 8,10,12 月之间无显著性差异外,其余月份之间差异显著。

由图 4 可知,在对照样地,半分解层凋落物有效拦蓄量平均值为 19.85 t/hm²,逐月呈先上升后下降再上升的趋势,在 8 月最高(28.20 t/hm²),7 月最低(5.75 t/hm²),其中 7 月显著低于 8—12 月,8 月与 11 月之间差异显著。与半分解层相比,各月份完全分解层有效拦蓄量明显更高(7—10,12 月差异显著),平均值为 46.64 t/hm²,其随月份的变化趋势较复杂(上升、下降再上升再下降),在 11 月最高(54.08 t/hm²),7 月最低(27.66 t/hm²),其中,7 月显著低于 8—11 月。在重度火烧迹地,半分解层凋落物有效拦蓄量明显低于对照样地半分解层(8—11 月差异显著),平均值为 7.45 t/hm²,其月变化规律与对照样地基本一致,在 9 月最高(9.72 t/hm²),7 月最低(5.40 t/hm²),各月份之间无显著差异。

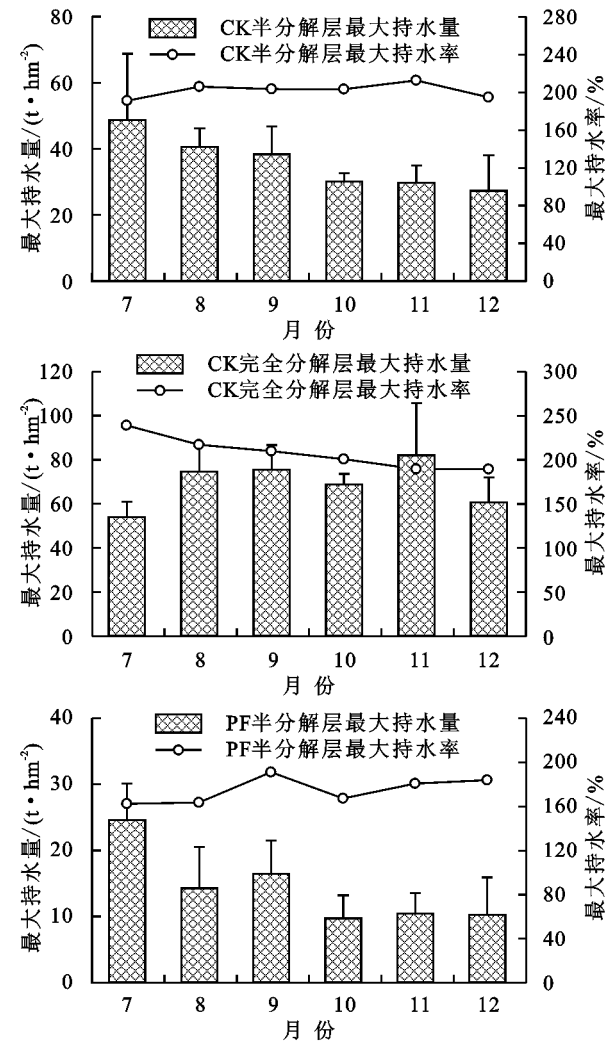
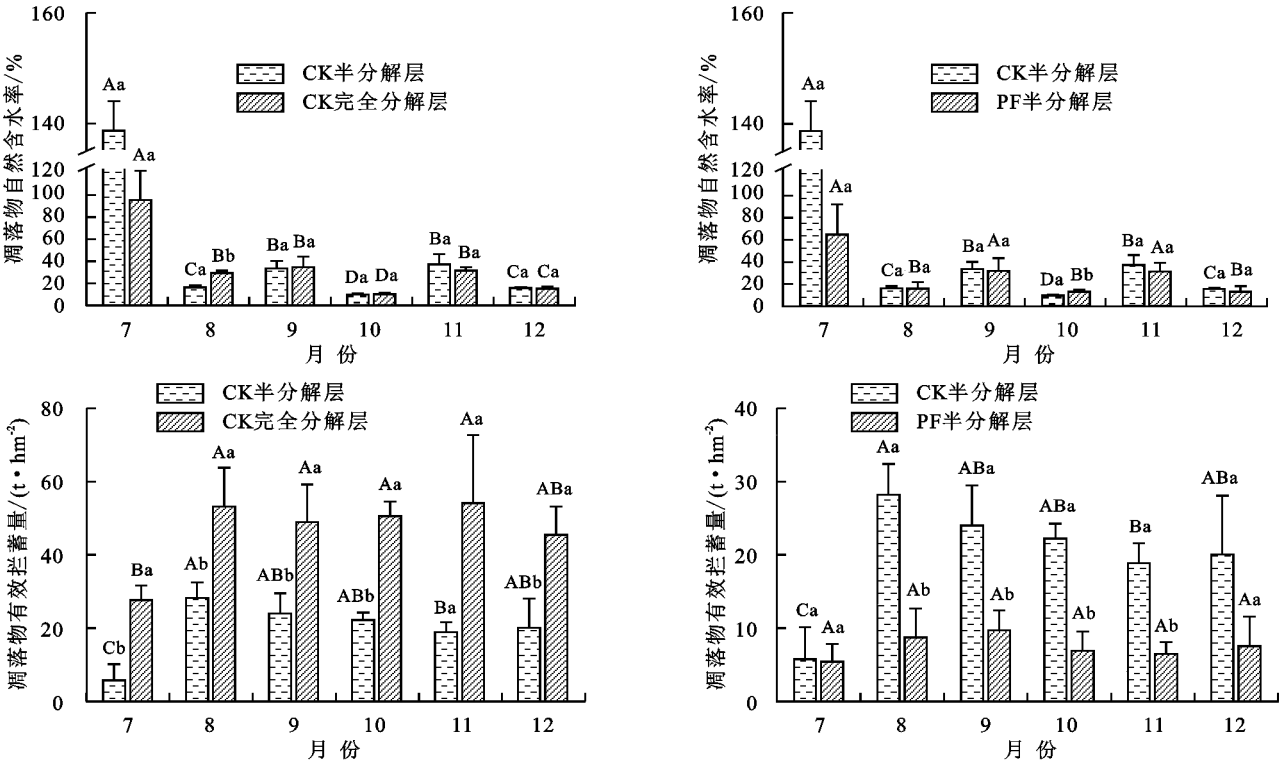


图 3 火干扰下油松人工林凋落物最大持水量与最大持水率



注:图柱上方不同大写字母表示不同月份间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示对照和火烧样地间差异显著($P<0.05$)。

图 4 火干扰下油松人工林凋落物自然含水率和有效拦蓄量

2.3 凋落物持水过程

由图 5 可知,凋落物在不同月份的持水量随浸水时间的变化趋势大致相同,其拟合的曲线均呈现出倒“J”形,随时间变化的过程大致可以分为 3 个阶段。第 1 阶段为吸持阶段(0~4 h):即在最初浸水的时间,凋落物的持水量呈快速增长趋势,到 4 h 时可达其饱和持水量的 80%左右,其中对照样地半分解层凋落物增幅(76.9%)小于完全分解层(81.6%),重度火烧迹地半分解层凋落物增幅最大(82.83%)。第 2 阶段为增持阶段(4~10 h):随着浸泡时间的延长(4~10 h),持水量依旧在不断增加,但其上升速度明显减慢,在 10 h 时可达其饱和持水量的 90%以上,其中

对照样地半分解层凋落物增幅(92.9%)大于完全分解层(92.2%),重度火烧迹地半分解层凋落物增幅依旧最大(95.6%)。第 3 阶段为保持阶段(10~24 h):在浸水后期(10~24 h),持水量增长趋势逐渐趋于平缓,并最终在 24 h 时达到饱和状态。受凋落物分解阶段的影响,对照样地 7—9 月半分解层凋落物持水量小于完全分解层,在 10—12 月则反之;而重度火烧迹地半分解层凋落物持水量小于对照样地半分解层。

对照样地半分解层、完全分解层决定系数(R^2)平均值分别为 0.72,0.42,重度火烧迹地半分解层相关系数(R^2)平均值为 0.53,整体上拟合效果较好,这表明持水量随时间变化的实测值与理论值相近。

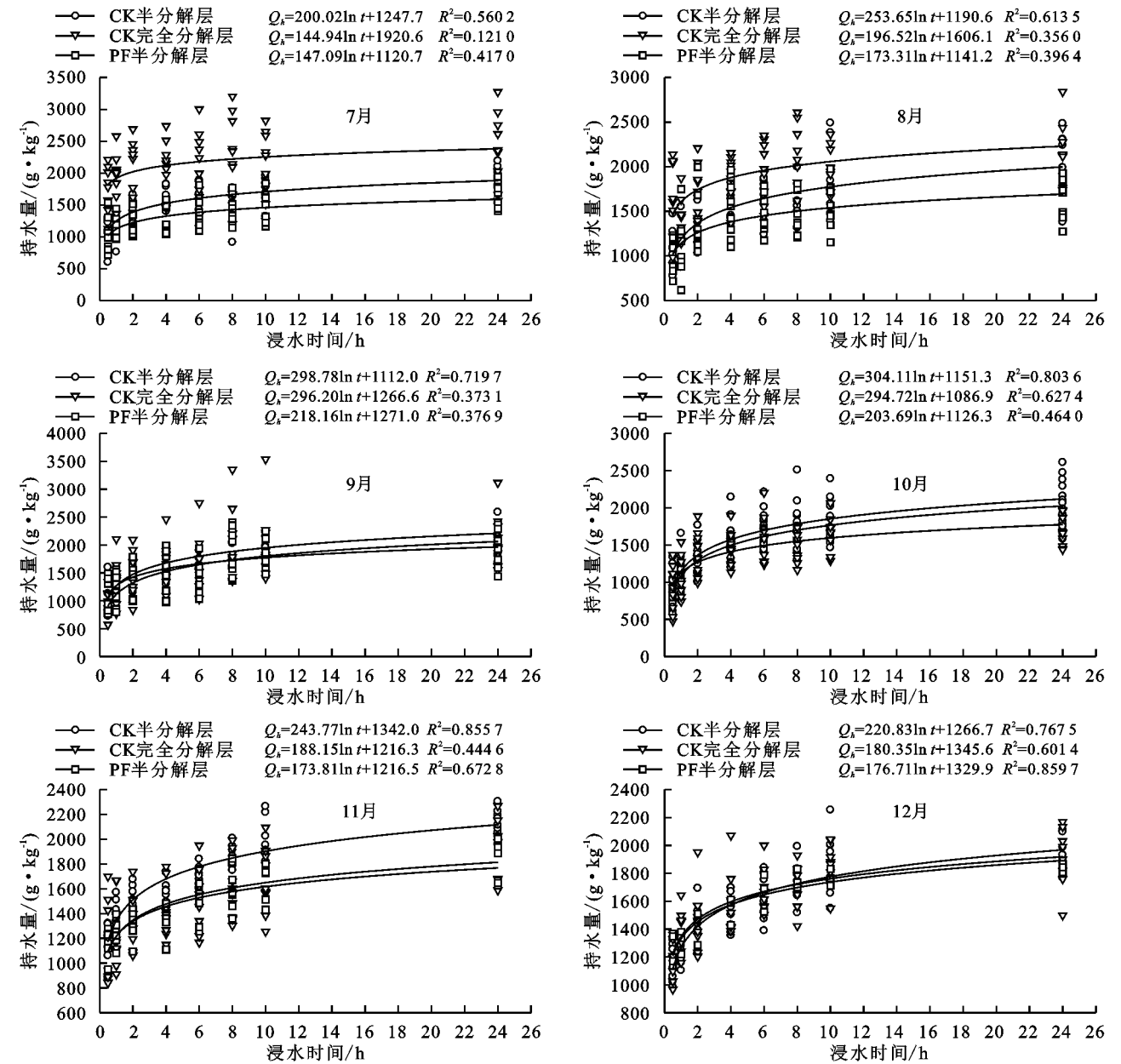


图 5 凋落物持水量与浸水时间的关系

由图 6 可知,凋落物在不同月份的吸水速率随浸水时间的变化趋势大致相同,即随着时间的增加表现出逐渐减小的趋势,其拟合的曲线均呈现出倒“L”

形。在浸水 0.5 h 时,凋落物的吸水速率处于最高峰,随后进入下降阶段。在浸水 4 h 内,凋落物的吸水速率下降最快。随着浸泡时间的增加(4~10 h),凋落物的吸

水速率下降减缓。在浸水后期(10~24 h),吸水速率下降趋势逐渐趋于平缓,并最终趋于 0,这表明凋落物此时处于吸水饱和状态。受凋落物分解阶段的影响,对照样地 7—9 月半分解层凋落物吸水速率小于完全分解层,在 10—12 月则反之;而重度火烧迹地半分解层凋落物

吸水速率小于对照样地半分解层。

对照样地半分解层、完全分解层决定系数(R^2)平均值分别为 0.94, 0.91, 重度火烧迹地半分解层(R^2)平均值为 0.93, 整体上拟合效果较好, 这表明吸水速率随时间变化的实测值与理论值相近。

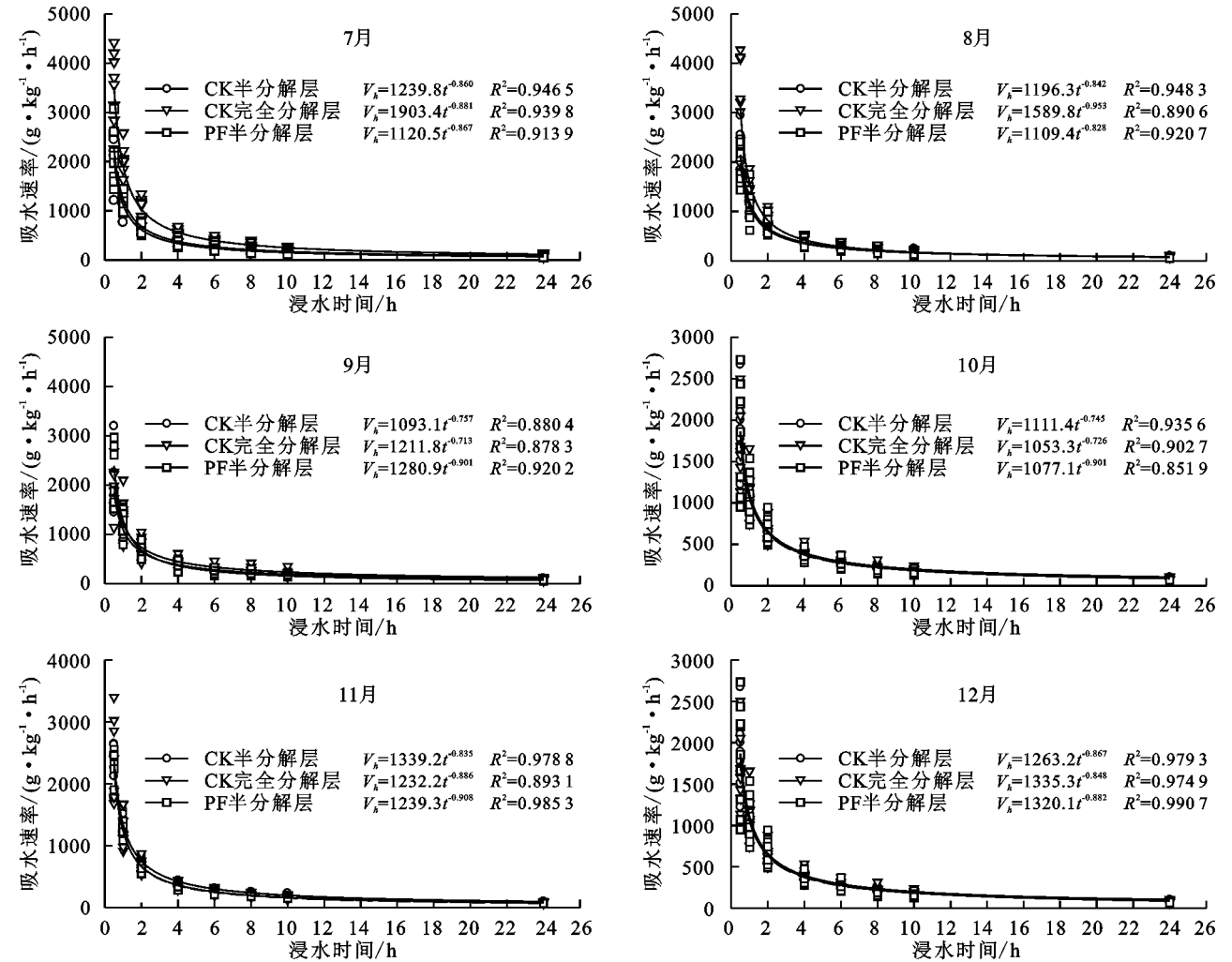


图 6 凋落物吸水速率与浸水时间的关系

3 讨论

3.1 凋落物分解

凋落物现存量主要受森林类型、立地条件以及人为活动等因素综合作用,它反映了凋落物生产量与消耗量之间的关系。本研究中,油松人工林(对照样地)半分解层凋落物 7 月现存量为 22.15 t/hm²,比八达岭以及冀北山区油松人工林高^[5,28],但比河北雾灵山油松人工林低^[29]。这可能与采集时间相关,采样前凋落物主要由半分解、完全分解层构成,后期由于人工遮盖,无新鲜凋落物输入;而林下植被的差异以及林分郁闭度、土壤因子等影响下凋落物分解速率的快慢也有可能是导致其差异的原因。完全分解层既有来自半分解层的输入,又有自身的分解输出,其现存量的变化则更为复杂。重度火烧迹地半分解层凋落物 7 月现存量仅为 13.33 t/hm²,这是由于火灾烧毁了林冠、林下植

被及凋落物层,重度火烧后 1 年凋落物大多由火后枯死树木、周边活立木以及更新的灌草等组成^[14]。

卜涛等^[30]研究认为,林火侵蚀土地表面,降低其吸水、保水能力,改变其结构和化学成分,最终减缓凋落物的分解速率。但本研究得到火烧后的分解速率大于对照样地,一方面乔木的大量缺失使得林分郁闭度下降,光照和空气流通加强,凋落物的分解速率加快,且相比于针叶,灌草等形成的枯枝落叶更易被分解;另一方面,可能与火烧 1 年后土壤水源涵养和养分循环功能的部分恢复有关。本研究凋落物分解时间较短,但在分解过程中依旧表现出先快速下降和后缓慢下降 2 个过程,这与大部分研究^[26,30]结果也是相符的。凋落物分解传统上一般采用网袋法,研究对象是新鲜凋落物,而本研究是基于凋落物原位分解法,此法可最大程度保留凋落物分解的原有环境条

件,研究对象为半分解层,其分解速率与新鲜凋落物相比有一定的差异。但较小的样方面积不利于样品采集,可能造成试验误差。因此,今后的研究中需采用更加完善的方法来监测凋落物从新鲜到半分解、完全分解的整个完整过程。

3.2 凋落物持水性能

凋落物最大持水量(率)是表征其持水性能的重要指标。对照样地半分解层凋落物最大持水率范围为 191.11%~212.60%,这一结果与王玲等^[5]研究结果相近,但略低于冀北山区以及河北雾灵山的油松人工林^[28-29]。这是因为处于不同的环境条件下,半分解层的分解程度存在一定的差异,且林下植被的构成也使得凋落物成分有所不同。完全分解层的最大持水率范围大于半分解层,且在分解过程中(7—12 月)呈现动态变化,这进一步表明凋落物持水性能受到分解程度的影响。重度火烧后,凋落物最大持水率明显低于对照样地,这说明凋落物持水性能受到外界环境因子以及凋落物自身性质的双重影响。因此,就半分解层凋落物而言,其最大持水率随分解程度的增加而增加,完全分解层则与之相反。凋落物最大持水量的变化趋势与最大持水率并不同步,这是因为最大持水量受到凋落物现存量、最大持水率的双重影响^[4]。本研究发现,在对照样地以及重度火烧迹地,凋落物现存量对最大持水量的影响大于最大持水率。在凋落物不断分解中,半分解层(对照、火烧)不断消耗转化为完全分解层,现存量逐渐减少,破碎程度增加,内部结构复杂化;而完全分解层既有输入又有输出,其破碎程度及现存量变化较为复杂^[21]。这体现出凋落物持水量(率)在相同月份不同分解层以及同一分解层不同月份之间的差异性。

有效拦蓄量可以更真实地反映凋落物对一次降水拦蓄的情况^[18]。对照样地半分解层凋落物有效拦蓄量范围为 5.75~28.20 t/hm²,这一结果在王玲等^[5]的研究范围内,但显著低于完全分解层的有效拦蓄量,而同一分解层在不同月份间也表现出一定的差异性。这说明凋落物有效拦蓄量不仅受到长期分解导致的凋落物分层的影响,短期分解带来的破碎化成为了另一种可能性。林火干扰后,8—11 月有效拦蓄量显著低于对照样地。这是因为火烧后初期植被更新较慢,林内郁闭度较低,光照增强,温度升高,加速了凋落物的分解,使得凋落物现存量、自然含水率均较低^[31-32]。

3.3 凋落物持水过程

在凋落物 24 h 浸水过程中,其持水量与浸水时间呈对数关系,吸水速率与浸水时间呈幂函数关系,与已有研究^[33-34]结果一致。在浸泡初期,受水势差的

影响较大,凋落物吸水速率较高,持水量也迅速增加。本研究表明,浸水时间在 0.5 h 吸水速率达到高峰,而在 4 h 时,凋落物持水量可达其饱和持水量的 80%;随着浸泡时间的增加,凋落物表面与水体的水势差逐渐减少,这导致吸水速率不断下降,持水量增加速率变缓,并最终导致吸水速率在 24 h 趋于 0,即达到饱和状态停止吸水^[35]。

相较于最大持水量,持水量的浸水过程与凋落物的现存量无关,它更侧重于反映不同时间段凋落物的吸水现状。对照样地半分解层持水量前 3 个月低于完全分解层,后 3 个月则反之。这反映了在凋落物分解中其持水量的动态变化过程,即随着凋落物的不断分解,持水量在不同月份间表现出差异性,这也进一步验证了凋落物持水性能与分解程度的相关性。重度火烧迹地半分解层凋落物持水量则始终小于对照样地半分解层,这说明火烧后的环境因子对凋落物自身性质的改变,是导致凋落物持水性能在火烧前后差异的重要原因。重度火烧迹地与对照样地半分解层凋落物吸水速率的曲线随着分解程度的增加,其函数模型曲线几乎重合。

4 结论

(1)油松人工林半分解层凋落物厚度及现存量(2.77 cm,16.18 t/hm²)略低于完全分解层(2.79 cm,31.88 t/hm²);火烧后分解加速,凋落物半分解层厚度及现存量均下降。

(2)油松人工林凋落物自然含水率、最大持水率(量)、有效拦蓄量在半分解层(41.94%,201.88%(35.80 t/hm²),19.85 t/hm²)和完全分解层(36.97%,207.74%(69.28 t/hm²),46.64 t/hm²)之间存在差异性;火烧后,半分解层凋落物各指标分别降低了 32.19%,13.36%,60.05%,62.47%。

(3)在持水过程中,7—9 月对照样地半分解层凋落物持水量、吸水速率小于完全分解层,10—12 月则反之;火烧后,半分解层凋落物持水量、吸水速率降低。

凋落物持水性能和持水过程中各指标均表现为完全分解层>半分解层,未火烧>重度火烧。

参考文献:

- [1] 刘蕾,申国珍,陈芳清,等.神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态[J].生态学报,2012,32(7):2142-2149.
- [2] Wang C, Zhao C Y, Xu Z L, et al. Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine forest catchment [J].Journal of Arid Land,2013,5(2):207-219.

- [3] 武启骞,王传宽,赵娟,等.帽儿山 2 种森林类型凋落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2015,29(3):161-166.
- [4] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.
- [5] 王玲,赵广亮,周红娟,等.八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应[J].生态环境学报,2019,28(9):1767-1775.
- [6] 王丽红,辛颖,邹梦玲,等.大兴安岭重度火烧迹地植被恢复过程中枯落物持水特征[J].水土保持学报,2014,28(6):262-267.
- [7] Huang Y H, Li Y L, Xiao Y, et al. Controls of litter quality on the carbon sink in soils through partitioning the products of decomposing litter in a forest succession series in South China [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(7): 1170-1177.
- [8] 李超,董希斌,宋启亮.大兴安岭白桦低质林皆伐改造后枯落物水文效应[J].东北林业大学学报,2013,41(10):23-27.
- [9] Tan Z H, Zhang Y P, Song Q H, et al. Rubber plantations act as water pumps in tropical China [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(24): e24406.
- [10] Stephens S L, Agee J K, Fulé P Z, et al. Managing forests and fire in changing climates [J]. Science, 2013, 342(6154): 41-42.
- [11] 秦倩倩,刘艳红.重度火烧干扰下的森林土壤功能[J].应用与环境生物学报,2021,27(2):503-512.
- [12] 孙龙,窦旭,胡同欣.林火对森林生态系统碳氮磷生态化学计量特征影响研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(2):1-9.
- [13] Butler O M, Elser J J, Lewis T, et al. The multi-element stoichiometry of wet eucalypt forest is transformed by recent, frequent fire [J]. Plant and Soil, 2020, 447(1/2): 447-461.
- [14] Keeley J E. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage [J]. International Journal of Wildland Fire, 2009, 18(1): 116-126.
- [15] 韩春兰,邵帅,王秋兵,等.兴安落叶松林火干扰后土壤有机碳含量变化[J].生态学报,2015,35(9):3023-3033.
- [16] Kong J J, Yang J, Bai E. Long-term effects of wildfire on available soil nutrient composition and stoichiometry in a Chinese boreal forest [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 1353-1361.
- [17] 杨新芳,鲍雪莲,胡国庆,等.大兴安岭不同火烧年限森林凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J].应用生态学报,2016,27(5):1359-1367.
- [18] 韩雪成,赵雨森,辛颖,等.大兴安岭北部火烧迹地兴安落叶松人工林土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(4):183-188.
- [19] 梁文俊,魏曦,赵伟文,等.关帝山不同林分结构华北落叶松林枯落物水文效应[J].水土保持学报,2021,35(2):324-329,337.
- [20] 杜雪,王海燕,耿琦,等.云冷杉针阔混交林枯落物持水性能[J].水土保持学报,2021,35(2):361-368.
- [21] 刘效东,乔玉娜,周国逸,等.鼎湖山 3 种不同演替阶段森林凋落物的持水特性[J].林业科学,2013,49(9):8-15.
- [22] Papa S, Cembrola E, Pellegrino A, et al. Microbial enzyme activities, fungal biomass and quality of the litter and upper soil layer in a beech forest of south Italy [J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(2): 274-285.
- [23] 李素丽,徐佳文,丁翊东,等.赣江中游水源涵养林乔木和蕨类植物凋落物持水和失水特征[J].水土保持学报,2021,35(3):170-176.
- [24] 刘一霖,温娅檬,李巧玉,等.川西高山峡谷区 6 种森林枯落物的持水与失水特性[J].水土保持学报,2019,33(5):151-156,162.
- [25] 秦倩倩.天然云冷杉针阔混交林凋落物生态功能及养分空间变异[D].北京:北京林业大学,2019.
- [26] 郑金萍,郭忠玲,徐程扬,等.长白山北坡主要森林群落凋落物现存量月动态[J].生态学报,2011,31(15):4299-4307.
- [27] 陆恩富,朱习爱,曾欢欢,等.西双版纳典型林型凋落物及其水文特征[J].生态学杂志,2021,40(7):2104-2112.
- [28] 宣立辉,佟彦国,张军,等.冀北山区油松人工林林分密度对枯落物层和土壤层水文特征的影响[J].林业与生态科学,2019,34(1):15-23.
- [29] 石媛,鲁绍伟,陈波,等.河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2014,28(3):92-97.
- [30] 卜涛,张水奎,宋新章,等.几个环境因子对凋落物分解的影响[J].浙江农林大学学报,2013,30(5):740-747.
- [31] 赵磊,王兵,蔡体久,等.江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J].水土保持学报,2013,27(1):203-208,246.
- [32] 张勇强,李智超,厚凌宇,等.林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J].土壤学报,2020,57(1):239-250.
- [33] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].生态学杂志,2019,38(9):2662-2670.
- [34] 郑森.华北土石山区不同林分类型枯落物及土壤水文生态效应[J].中国水土保持科学,2020,18(2):84-91.
- [35] 张建利,王加国,李革洁,等.贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃林枯落物储量及持水功能[J].水土保持学报,2018,32(3):167-173.