

小五台山典型林分枯落物持水恢复能力研究

杜晨曦¹, 史常青¹, 杨建英¹, 艾宪锋¹, 冷流江¹, 张业飞², 楚紫辉², 张一璇¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.河北小五台山国家级自然保护区管理中心,河北 张家口 075700)

摘要: 枯落物层作为森林生态系统的独特层次,截留吸持降水的能力称为枯落物持水能力。降水结束后枯落物暂持水分继续蒸发、下渗,用以调节大气及土壤中的水分以便于下次持水,因此枯落物水分蒸发、下渗的过程亦是其持水能力恢复的过程。以小五台山 7 种典型林分为研究对象,通过结合野外调查采样及较为符合实际情况的枯落物失水试验,对不同林分枯落物持水恢复能力进行综合研究。结果表明:(1)枯落物层持水能力及可持水量均随着时间逐渐恢复。失水试验进行到 8 h 时,所有林分未分解层枯落物持水能力恢复到 80% 以上,除桦树林外的其余林分半分解层枯落物持水能力恢复到 60% 以上。试验经过 12 h 后各层枯落物持水能力恢复趋势逐渐缓慢。(2) 7 种典型林分枯落物未分解、半分解层水分蒸发、下渗过程与持水过程的规律一致,前期蒸发、下渗量较大,后期随着可释放水量的减少而逐渐降低。经拟合蒸发、下渗量与时间符合对数函数关系,蒸发、下渗速率与时间符合幂函数关系。(3)小五台山典型林分枯落物调蓄水分效应总体表现为持水较快,持水后水分蒸发、下渗较慢的特征。通过聚类分析可以将 7 种典型林分划分为 3 类调蓄水分功能群。未来在该地区或其他生境相似区域的水源林树种配置中将功能群纳入考虑依据,可以实现发挥枯落物最佳的生态水文功能。

关键词: 持水恢复能力恢复; 枯落物; 小五台山

中图分类号: S727.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0236-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.033

Recovery Characteristics of Water-holding Capacity of Litter in Typical Stands of Xiaowutai Mountain

DU Chenxi¹, SHI Changqing¹, YANG Jianying¹, AI Xianfeng¹,

LENG Liujiang¹, ZHANG Yefei², CHU Zihui², ZHANG Yixuan¹

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Xiaowutai Mountain National Nature Reserve Management Center, Zhangjiakou, Hebei 075700)

Abstract: Forest litter layer, as a unique layer of forest ecosystem, can intercept and absorb precipitation which is called litter water retention capacity. After precipitation, the temporary water of litters will continue to evaporate and infiltrate, adjust the water in the atmosphere and soil to facilitate the next water holding. Seven typical forests of Xiaowutai Mountain were taken as research objects, through combining field investigation and sampling and litter dehydration test which was more in line with the actual situation, the restoration characteristics of litter water holding capacity of different forests were comprehensively studied. The results showed that: (1) The water-holding capacity of litter layer gradually recovered with time. When the water loss test was carried out for 8 hours, the water holding capacity of the non-decomposed litter layer of all stands was restored to over 80%, and the water holding capacity of the litter in the semi-decomposed layer of the rest stands except pure forest of *Betula* was restored to over 60%. After 12 hours, the recovery trend of water-holding capacity of litter in each layer was gradually slow. (2) The laws of the non-decomposed, semi-decomposition litter layer water evaporation, infiltration and water holding process of seven typical stands were the same. The amount of evaporation and infiltration was larger in the early stage, and gradually decreased with the decrease of the amount of released water in the later stage. After fitting, the evaporation and infiltration amount were in logarithmic function relation with time, while the evaporation and infiltration rate were in power function relation with time. (3) Litter regulation and water storage effect of typical stands

收稿日期: 2020-11-21

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001)

第一作者: 杜晨曦(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 2228693027@qq.com

通信作者: 史常青(1969—), 男, 副教授, 主要从事水土保持及林业生态工程研究。E-mail: scqbj@126.com

in Xiaowutai Mountain was generally characterized by the faster water retention and slower water evaporation and infiltration after water retention. Through cluster analysis, seven typical stands could be divided into three types of functional groups for regulating and storing water. In the future, functional groups should be taken into account in the tree species allocation of water source forests in this area or other similar habitats, which could realize the best ecological and hydrological functions of litter.

Keywords: restoration of litter water-holding capacity; forest litter; Xiaowutai mountain

枯落物层在林地物质、水文循环中都发挥着重要作用^[1-2],具有涵养水源、延缓径流汇流时间、降低径流流速等重要生态水文功能^[3-5]。以往研究^[6]主要着眼于枯落物层一次性的持水能力,忽略了枯落物层持水过程是反复的,失水也是其调蓄水分的重要方面;通常枯落物所蓄留的水分在降水结束后部分以蒸发的形式返回大气,部分以下渗的形式补给土壤层水分,对调节和改善林地小气候、土壤层水分有一定的影响^[7]。相关研究^[8]表明,枯落物水分蒸发、下渗量和速率的大小除受到气象条件、地表覆盖、下垫面及水质等因素的影响外,不同树种、林龄、层次也会对充分吸水条件下枯落物蒸发量造成差异,保水周期约为7~10天;不同林分间枯落物所截留水分蒸发、下渗的速率一般表现为阔叶林>针叶林^[9-10];张增信等^[11]在苏南丘陵森林研究发现,枯落物水分平均蒸发量与枯落物含水率之间呈显著负相关。一般,中国主要森林枯落物蒸发量的月份间差异显著,夏季蒸发量远大于冬季,且枯落物水分蒸发、下渗过程较持水过程达到稳定所需的时间长,表明枯落物具有良好的调蓄水分及保水能力^[12]。枯落物水分较慢的蒸发、下渗可以长久稳定地供给林地水分,起到调节径流、涵养水源的作用。现关于枯落物失水的研究主要探索揭示了枯落物蒸发、下渗量以及速率与时间之间的关系^[13-14],忽略了枯落物水分蒸发、下渗过程实则也是其持水能力的恢复过程,现研究阶段关于枯落物持水恢复能力的报道研究较少。鉴于此,本研究选取小五台山7种典型林分枯落物为研究对象,模拟研究了枯落物饱和和持水后蒸发、下渗的过程来研究其持水恢复能力,并根据枯落物持水及失水过程中各项生态水文功能指标进行水源涵养功能群划分,综合分析不同林分枯落物调蓄水分功能,为进一步阐明森林涵养水源、调蓄径流机理提供理论依据,为将来该地区或其他生境相似区域的水源涵养林树种选择及配置提供科学依据和基础支撑。

1 研究区概况

选取小五台山国家级自然保护区作为试验研究地。小五台山坐落于河北省张家口市蔚县(39°50'41"—40°06'30"N,114°47'80"—115°28'56"E),地处太行山、燕山和恒山交汇地带,居燕山之尾,恒山之首,是太行

山脉的最高峰,拥有东、西、南、北、中5个山峰。地形复杂多变,海拔落差大,地势险峻。由于小五台山离北京市区仅有125 km,因此有“京门屏障”的美誉。小五台山地处暖温带半湿润地区,气候类型属于北温带大陆季风气候,具有四季分明、冬长夏短、雨热同期、昼夜温差较大等特点。因其海拔较高,落差较大,山顶与山脚的气候差异较大,具有“一山有四季,咫尺不同天”的现象,海拔在1 000~1 300 m为温暖带气候,在1 300~1 800 m为中温带气候,在1 800~2 500 m为冷温带气候,在2 500 m以上为高寒带气候。小五台山年均降水量381~420.2 mm,无霜期为135~140天,平均日照时间2 875 h。属于典型的华北土石山区,以山地棕壤土、栗钙土、褐土亚高山草甸土等土壤类型为主。现存主要林分有油松林、桦树林、杨树林、蒙古栎林、椴树林、落叶松林、油松×蒙古栎混交林、粉桦×云杉混交林、白桦×油松混交林等。

2 研究方法

2.1 样地调查采样

2.1.1 研究对象 根据小五台山地区之前研究^[15-16]结果,结合实际调查以及咨询当地护林员,确定选取油松林(pure forest of *Pinus tabulaeformis* Carrière)、杨树林(pure forest of *Populus* L.)、桦树林(pure forest of *Betula*)、椴树林(pure forest of *Tilia tuan* Szyszyl.)、油松×蒙古栎混交林(mixed forest of *Pinus tabulaeformis* Carrière and *Quercus mongolica* Fisch.ex Ledeb.)、蒙古栎林(pure forest of *Quercus mongolica* Fisch.ex Ledeb.)、粉桦×云杉混交林(mixed forest of *Betula platyphyllo* SUK and *Picea asperata* Mast.)7种典型林分作为研究对象(表1)。

2.1.2 枯落物收集与处理 研究于2019年8月18—26日进行野外采样,在7种典型林分样地各选取20 m×20 m样方1块,记录样地海拔、经纬度、坡度、坡向、郁闭度等基本信息(为了消除林下灌草枯落物的影响,需要尽量选取郁闭较高,人为干扰较少的样地)。对每种典型林分样方内所有样木进行逐株调查:逐株进行编号、测定树高、胸径、冠幅;通过划分径阶,绘制胸径树高曲线,结合冠幅计算分析得到样方标准木,在样方标准木冠幅投影覆盖范围内随机设置2个1 m×1 m的枯落物样方,将未分解、半分解层枯落物分开收集,装入

网兜内,再将其放入泡沫箱里防止途中损坏。带回室内 迅速称其鲜质量,称重后放在干燥通风处风干。

表 1 样地基本信息

林分类型(龄组)	海拔/m	坡向	坡度/(°)	郁闭度/%	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm	混交比
油松林(成熟林)	1250	阴坡	28	96	43	10.1	19.69	
杨树林(过熟林)	1290	阳坡	30	90	34	13.1	20.34	
桦树林(过熟林)	1280	/	0	84	31	11.9	18.20	
椴树林(成熟林)	810	半阳坡	27	86	29	14.1	12.20	
蒙古栎林(中龄林)	820	阳坡	33	93	27	14.9	10.80	
油松×蒙古栎混交林	690	半阴坡	31	92	25	蒙古栎:19.6 油松:10.8	蒙古栎:38.59 油松:21.61	1:1
粉桦×云杉混交林	1960	阴坡	35	81	29	粉桦:8.3 云杉:6.8	粉桦:13.88 云杉:10.41	5:1

2.2 模拟试验

2.2.1 枯落物持水与持水恢复能力测定

(1) 枯落物持水能力主要通过浸泡试验测定:在室温下,将各层枯落物分别装入尼龙网袋并封口,于容器内浸泡(同时设置空尼龙网袋作为空白组)。浸泡过程中注意使所有的枯落物淹没于水面以下,分别在间隔 0.25,0.5,1,2,4,6,8,10,12,24 h 时对枯落物进行称重,每次捞起静置 15 s 左右至枯落物不滴水时称重并记录过程,计算枯落物最大持水量、速率等持水能力指标。

(2) 枯落物持水恢复能力主要通过失水试验测定:将持水 24 h 的枯落物取出后,根据其在野外自然条件下的分布,按照未分解层、半分解层从上到下排列,与尼龙网袋放在土(沙子)上,使其自然失水(同样设置空白组),同样分别于 0.25,0.5,1,2,4,8,12,24,36,48,72 h 对枯落物进行称重,至连续 3 次称量枯落物重量不再变化为止。记录过程并计算枯落物水分蒸发、下渗量及速率等指标。

2.2.2 数据分析与处理 样地调查与试验所得数据用 Excel 2010 软件整理后,应用 SPSS 25.0 软件拟合枯落物水分蒸发、下渗量及速率与时间之间统计学关系以及划分枯落物调蓄水分功能群,并结合 Excel 2010 与 Origin 7.0 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 枯落物水分蒸发、下渗动态过程

失水试验结果表明,枯落物水分蒸发、下渗过程比持水过程进行更为缓慢,达到稳定所需要的时间更长,说明枯落物具有良好的保水和调蓄水分的能力。枯落物水分蒸发、下渗结束用时一般在 72 h 左右。图 1 和图 2 分别为 7 种典型林分半分解、未分解层枯落物水分蒸发、下渗动态过程,两者变化趋势基本一致。累积蒸发、下渗量随着时间逐渐增加,试验初期水分蒸发、下渗较快,后期逐渐趋于稳定。所有林分

未分解层在试验前 2 h 蒸发、下渗量较大,在图 1 中枯落物含水量表现出近乎垂直下降,其中椴树林的蒸发、下渗量最大,达到了最大持水量的 67.08%;最小的为桦树林,为最大持水量的 26.83%。试验进行 6 h 之后,枯落物蒸发、下渗量随时间变化逐渐趋于稳定,72 h 时基本恢复到自然含水状态,此时桦树林未分解枯落物持水量最高,为 0.098 t/hm²。因为是用浸泡 24 h 后的枯落物进行失水试验的,分析发现,失水试验前 15 min 之内未分解层持水量较大的枯落物蒸发、下渗量同样也大,如杨树林、桦树林、油松×蒙古栎混交林蒸发下渗量分别为最大持水量的 30.45%,24.00%,31.01%。不同于未分解层,半分解层在失水试验前 24 h 时,平均蒸发、下渗量才达到最大持水量的 33%。半分解层在失水试验的前 36 h 之内,蒸发、下渗量变化均较大,表现为图 2 中 24 h 后曲线变化较未分解层明显。蒸发、下渗量最大的是椴树林,为最大持水量的 91.7%;最小的为桦树林,为最大持水量的 64.4%。

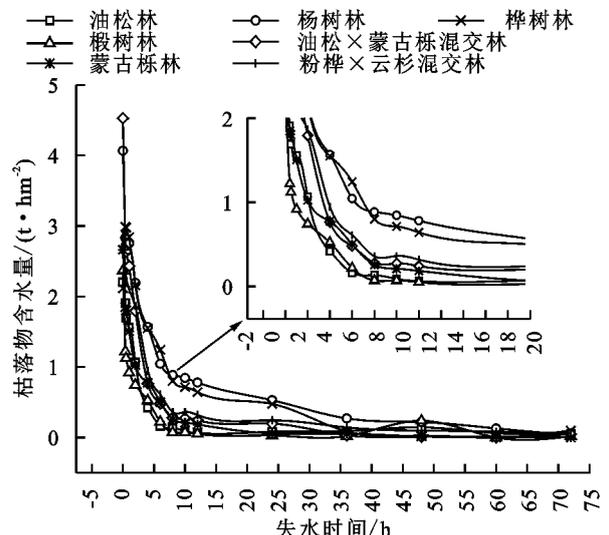


图 1 典型林分未分解层枯落物水分蒸发、下渗过程

枯落物水分蒸发、下渗速率可以表征枯落物水分蒸发、下渗的快慢程度。图 3 和图 4 为未分解、半分解层枯落物水分蒸发、下渗速率曲线图,在前 15 min

之内,油松林和蒙古栎林未分解层枯落物蒸发、下渗速率变化较小,因为油松为针叶林,持水量即可释放水量较其他林分小,蒙古栎林枯落物叶片残体表面积较大,暂存水分不易流失。杨树林失水速率高出油松林和蒙古栎林 4 倍左右,其余林分高出油松林和蒙古栎林 2~3 倍。半分解层杨树林、桦树林、蒙古栎林的蒸发、下渗速率较其他林分大。因为其为阔叶林,最大持水量也相较于其他林分枯落物大,可供释放的水量也比较多,所以速率变化较为明显,蒸发、下渗速率随着可供释放水量的减少而逐渐降低,所有林分在试验进行 10 h 以后基本处于较为稳定的状态,平均速率为 $0.034 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。从图 3 和图 4 的局部放大图可以看出,半分解层的速率变化较未分解层更加大,在前 15 min 内半分解层蒸发、下渗速率甚至出现了负数,在分析蒸发、下渗量变化时提到,未分解层有部分水分下渗进入半分解,相当于半分解层在水分流失的同时也得到了水量的补给,如果补给的水量大于蒸发、下渗的,会出现速率为负数的现象。枯落物水分蒸发、下渗过程持续了 72 h,在后 48 h 测量时因为枯落物直接放在野外土壤上,由于早上“返潮”现象,出现了蒸发下渗速率为负数的现象,但是数值较小,约为 $-0.00070 \sim -0.00014 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,且返潮水量仅占总失水量的 $0.005\% \sim 0.016\%$,可忽略不计。

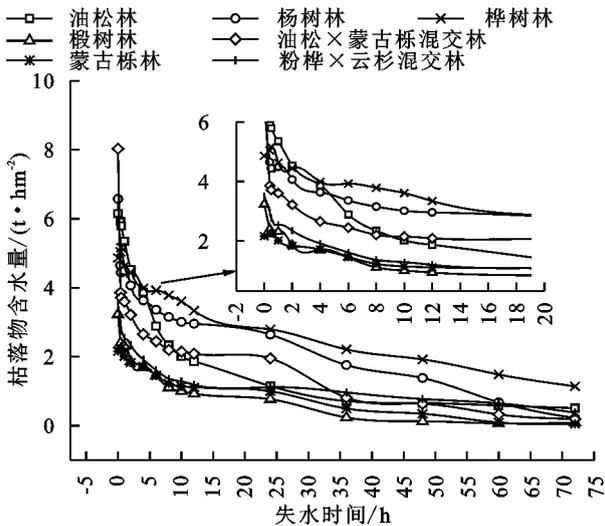


图 2 典型林分半分解层枯落物水分蒸发、下渗过程

为了进一步研究枯落物水分蒸发、下渗量与时间之间的统计学关系,应用 SPSS 25.0 软件进行拟合发现,蒸发下渗量与时间关系拟合符合对数函数关系,速率与时间经拟合分析符合幂函数模型。不同林分枯落物层蒸发、下渗量及速率与时间的关系见表 2 和表 3。

3.2 不同林分枯落物层持水恢复能力

枯落物调蓄水分的能力仅用蒸发、下渗量和速率来反映较为片面,忽略了最大持水量可能会对枯落物

水分蒸发下渗过程造成的影响,如最大持水量大,可供释放水量多,其蒸发、下渗速率也大,与枯落物自身特性无关。枯落物水分蒸发、下渗过程亦反映枯落物持水恢复能力,因此,计算不同时间段枯落物持水能力的恢复情况可以更加全面地表征枯落物调蓄水能力的恢复情况,用枯落物最大持水量与其不同时间段蒸发、下渗量的差值来反映其可持水量,两者差值与最大持水量的比值来反映其持水能力恢复过程。

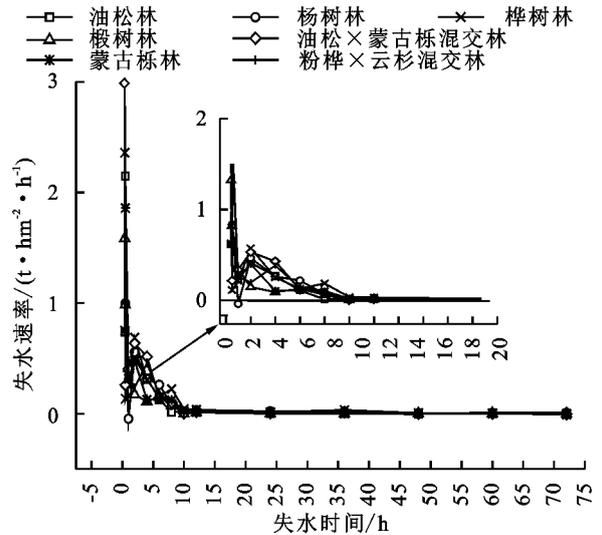


图 3 典型林分未分解层枯落物水分蒸发、下渗速率变化过程

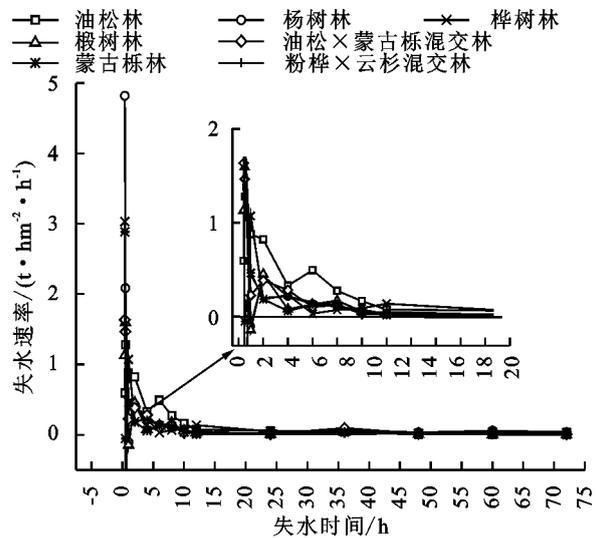


图 4 典型林分半分解层枯落物水分蒸发、下渗速率变化过程

从图 5 可以看出,枯落物层持水能力及可持水量均随着时间逐渐恢复。纯林样地半分解层枯落物可持水量恢复较未分解层平缓一点,慢一点,如油松未分解层枯落物持水能力在 2 h 时已经恢复到 51.6%。但半分解层仅恢复到 37.5%;同样桦树、椴树未分解层枯落物持水能力在 2 h 时已经恢复至 45.1%,59.9%,但半分解层仅恢复到 30.9%,48.6%。但在混交林样地如粉桦×云杉混交林未分解与半分解持水能力恢复差异不大,分别为 59.5%,57.3%,甚至油松×栓皮栎混交林半分解层持水恢复能力优于未分解层。

表 2 典型林分枯落物层蒸发、下渗量与时间关系

分解层次	林分类型	蒸发、下渗量与时间的关系式	概率 P	R^2
未分解层	油松林	$S = -17.060 \ln t + 162.958$	0	0.840
	杨树林	$S = -43.116 \ln t + 286.193$	0	0.957
	桦树林	$S = -49.941 \ln t + 323.365$	0	0.827
	椴树林	$S = -23.875 \ln t + 142.981$	0	0.836
	油松×蒙古栎混交林	$S = -43.615 \ln t + 264.810$	0	0.858
	蒙古栎林	$S = -42.858 \ln t + 264.155$	0	0.894
	桦树×云杉混交林	$S = -44.770 \ln t + 280.522$	0	0.889
	油松林	$S = -22.640 \ln t + 216.411$	0	0.859
	杨树林	$S = -25.381 \ln t + 260.143$	0	0.905
	桦树林	$S = -22.468 \ln t + 345.340$	0	0.754
半分解层	椴树林	$S = -35.570 \ln t + 279.691$	0	0.891
	油松×蒙古栎混交林	$S = -23.288 \ln t + 237.994$	0	0.866
	蒙古栎林	$S = -34.831 \ln t + 280.331$	0	0.956
	桦树×云杉混交林	$S = -23.187 \ln t + 235.501$	0	0.960

注: S 为蒸发、下渗量(t/hm^2); t 为时间(h)。

表 3 典型林分枯落物层蒸发、下渗速率与时间关系

分解层次	林分类型	蒸发、下渗速率与时间的关系式	概率 P	R^2
未分解层	油松林	$V = 0.718 \cdot t^{-1.483}$	0	0.776
	杨树林	$V = 1.371 \cdot t^{-1.129}$	0.002	0.771
	桦树林	$V = 1.876 \cdot t^{-1.284}$	0.002	0.770
	椴树林	$V = 1.186 \cdot t^{-1.485}$	0	0.776
	油松×蒙古栎混交林	$V = 1.899 \cdot t^{-1.430}$	0	0.779
	蒙古栎林	$V = 1.570 \cdot t^{-1.363}$	0	0.778
	桦树×云杉混交林	$V = 1.601 \cdot t^{-1.351}$	0	0.777
	油松林	$V = 0.638 \cdot t^{-1.184}$	0.002	0.752
	杨树林	$V = 0.471 \cdot t^{-1.005}$	0.004	0.691
	桦树林	$V = 0.600 \cdot t^{-0.988}$	0.005	0.684
半分解层	椴树林	$V = 0.845 \cdot t^{-1.105}$	0.003	0.729
	油松×蒙古栎混交林	$V = 0.454 \cdot t^{-1.009}$	0.004	0.693
	蒙古栎林	$V = 0.825 \cdot t^{-1.129}$	0.003	0.737
	桦树×云杉混交林	$V = 0.630 \cdot t^{-1.212}$	0.002	0.758

注: V 为蒸发、下渗速率($t/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); t 为时间(h)。

所有林分未分解层枯落物基本在 8 h 时,持水能力基本恢复到 80% 以上,油松林、椴树林、粉桦×云杉混交林的持水能力恢复已经达到 90% 以上。而大多数林分除桦树林外半分解层持水能力恢复到 60% 以上,桦树林仅有 41%。

到 12 h 时,枯落物持水能力已基本恢复到平衡,缓慢增长。最为明显的是油松林、椴树林、蒙古栎林以及粉桦×云杉混交林未分解层,12 h 后持水能力分别恢复到 97.15%, 97.24%, 93.34%, 94.25%。到 72 h 时,各层枯落物持水能力恢复到 97% 以上,仅有桦树半分解层为 82.24%,油松×蒙古栎混交林半分解层为 93.59%。

3.3 枯落物调蓄水分功能群划分

以单个林分为研究对象,在实际应用中存在难分类管理、无法寻找替代种等缺陷,因此将功能或形状

相似的物种进行组合,将研究尺度由单一物种推至功能群,有利于更加准确预测系统的整体行为效益等^[17],在地区水源林树种配置中将功能群纳入考虑依据,可以辅助实现发挥枯落物最佳的水文生态功能。因此本研究选取枯落物蓄积量、自然含水率、最大持水速率、最大持水量、饱和持水深、有效拦蓄深、最大蒸发下渗速率、最大蒸发下渗量、最大蒸发下渗水深、叶质地和叶生活期共 11 个枯落物生态水文功能指标为依据来进行枯落物调蓄水分功能群的划分。其中,叶质地和生活期可以综合反映树种对于生境因子适应的结果。叶片特征以树种中龄树树冠上的成熟健康叶片为准,混交林以优势种叶片特征为准,叶质地与叶生活期需进行指标转换,转为定量指标,本试验叶质地采用 1 代表革质,2 代表纸质;叶生活期 1 代表常绿,2 代表落叶。

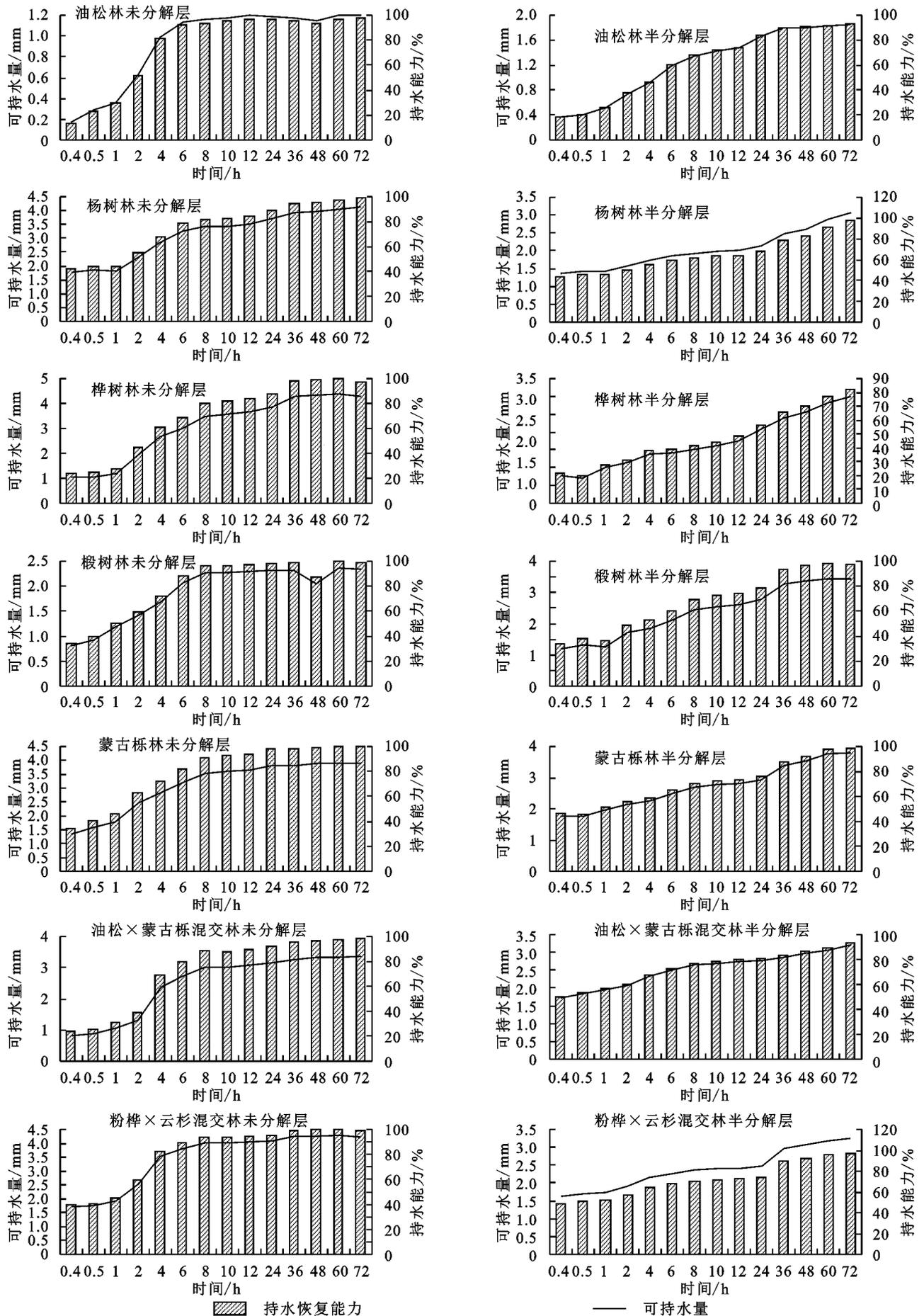


图 5 典型林分持水能力及持水量恢复过程

主成分提取结果显示,研究中前 2 位主成分的特征值 >1 ,分别可以解释 55.78%,29.17%的总数据变异。其中,最大持水量、最大持水速率、最大蒸发下渗量、有效拦蓄深、饱和持水深在主成分 1 中荷载较大;叶生活期、叶质地、最大蒸发下渗速率在主成分 2 中荷载较大,表明枯落物的持水能力主要是受到最大持水量及速率的影响,一般表现为最大持水量及速率越

表 4 主成分分析方差解释表

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累计/%	总计	方差百分比/%	累计/%	总计	方差百分比/%	累计/%
1	6.136	55.780	55.780	6.136	55.780	55.780	5.529	50.263	50.263
2	3.209	29.176	84.956	3.209	29.176	84.956	3.816	34.692	84.956
3	0.845	7.680	92.635						
4	0.443	4.028	96.663						
5	0.324	2.948	99.612						
6	0.043	0.388	100.000						
7	1.37 E-16	1.24 E-15	100.000						
8	8.49 E-17	7.72 E-16	100.000						
9	-2.21 E-17	-2.01 E-16	100.000						
10	-1.93 E-16	-1.75 E-15	100.000						
11	-1.49 E-15	-1.35 E-14	100.000						

对 SPSS 25.0 主成分分析得到的因子得分并对 7 种典型林分进行聚类分析,图 6 为聚类分析谱系图。当各组间差异距离为 8 时,7 种林分可划分为 3 类调蓄水分功能群:第 1 组仅有油松林,表现为持水快,截留水分蒸发、下渗也快,枯落物调蓄水分潜力较小;第 2 组为椴树林、蒙古栎林、粉桦 \times 云杉混交林,其调蓄水分功能在 3 类功能群里相对较强,持水及水分蒸发、下渗都为中等,且持水潜力也较大,其中粉桦 \times 云杉混交林混交比为 5:1,云杉针叶较小且短,因此粉桦 \times 云杉混交林中粉桦枯落物残体起到生态水文功能作用较大;第 3 组为杨树林、桦树林、油松 \times 蒙古栎混交林,该功能群调蓄水分能力最强,持水较快,截持潜力较大,且截留量蒸发、下渗慢,其中油松 \times 蒙古栎混交林混交比为 1:1,且蒙古栎叶片残体表面积较大,与降水接触空间更大,枯落物残体的生态水文功能更加明显。总体来说,小五台山区阔叶林和针阔混交林枯落物层的水文功能优于针叶林。

4 讨论

本研究新增了关于枯落物失水和持水恢复能力方面的研究。通常枯落物持水表征其吸收水分的能力,而失水则反映其持水恢复能力及其保水能力。枯落物吸持水分是循环的,分析枯落物水分效应从其持水及持水恢复能力 2 个方面来分析,将两者相结合研究可以很好地表征枯落物调蓄水分的能力。持水受自身持水潜力大小的影响^[18-19],反映潜在的截留水分的能力,而失水受到枯落物残体保水能力以及可供释放水量大小的限制,反映潜在的调控能力^[6]。失水试验前 2 h,枯落物

大,持水能力越强。饱和持水深、有效拦蓄深、叶质地、叶生活期也是影响枯落物调蓄水分效应的主要因子。从主成分提取结果可以得出,影响枯落物调蓄水分的因素既有持水性能方面的,也有失水性能方面的,持水反映潜在持水能力,水分蒸发、下渗反映潜在调控能力。因此,分析枯落物调蓄水分功能应包括持水及其水分蒸发、下渗 2 个方面。

未分解层与半分解层失水量变化差异较大的原因有:(1)未分解层下渗的水分首先进入半分解层,相当于半分解层在浸泡结束后还受到来自未分解层枯落物水分的补给;(2)未分解层未受到外界环境因子如光照、风、湿度等直接作用,且下层土壤受到枯落物层下渗的水分变湿润,所以相当于半分解层枯落物处于一个较为湿润的环境里,而湿度也是影响水分蒸发的一个主要因素^[20-21],因而其蒸发下渗量初期变化也会较为缓和。

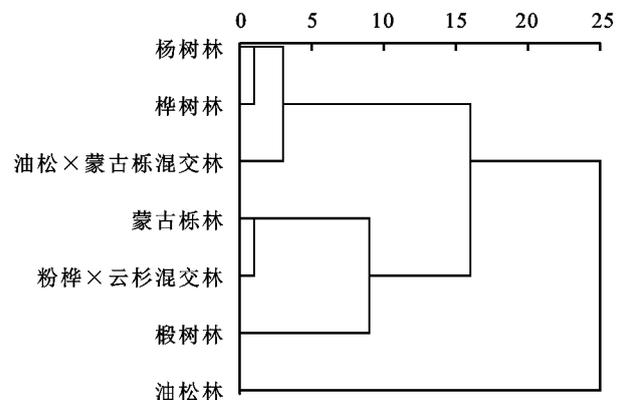


图 6 典型林分聚类分析(组间)谱系

研究从枯落物失水过程同样也是其持水能力的恢复过程角度进行分析,油松林各层枯落物持水能力在试验的 2~6 h 均有斜率较为明显的增幅,这段时间内油松枯落物水分蒸发、下渗量较大,持水能力恢复较快,因为油松松针细长,其他林分均有阔叶叶片,残体表面积较大,水分不易滴落下渗^[22],且也有研究^[23]发现,枯落物水分蒸发、下渗时,阔叶林枯落物床层含水率变化与风速等环境因子不相关,而针叶林

呈显著相关。一般,枯落物失水初期含水量与达到平衡时含水量之差的63%所需时间一般被称为时滞^[24],如本研究中油松林未分解层和椴树林未分解层,油松林主要因为形态其时滞较其他林分小,而椴树因为蓄积量较小所以时滞同样也小。本研究中多数林分枯落物层的时滞都在60~72 h,但是张运林^[23]在黑龙江帽儿山林场研究发现,蒙古栎林和红松林2种枯落物类型的时滞分别在16.34,52.32 h,针叶林枯落物的时滞大于阔叶林,造成结论差异的原因主要是枯落物时滞一般与枯落物形态、组成、蓄积量以及试验时的外界环境因子等有关系^[25]。未来在枯落物层失水及持水恢复能力方面的研究可以进一步细化枯落物层含水率变化过程,如不同时间段枯落物层水分的蒸发量与下渗量,有助于更深入了解外界环境因子及枯落物自身特性对失水过程的影响。

5 结论

(1)枯落物浸泡24 h后的持水量一般在72 h内会蒸发、下渗完毕。前2 h内纯林半分解层持水恢复能力优于未分解层,但粉桦×云杉混交林未分解与半分解层持水恢复能力差异不大,油松×栓皮栎混交林半分解层持水恢复能力优于未分解层。8 h时,所有林分未分解层枯落物持水能力恢复到80%以上,大多数林分除桦树林外半分解层持水能力恢复到60%以上。到12 h时,枯落物层持水恢复能力基本已经稳定,其中油松林、椴树林、蒙古栎林以及粉桦×云杉混交林未分解层持水能力分别恢复到97.15%,97.24%,93.34%,94.25%。

(2)小五台山典型林分枯落物水分蒸发、下渗量及速率与时间关系拟合分别符合对数、幂函数关系。

(3)小五台山典型林分枯落物调蓄水分功能总体上表现为阔叶林和针阔混交林枯落物层的水文功能优于针叶林。未来在该区水源涵养林配置上可优先考虑种植阔叶林如杨树、桦树等,针阔混交林如油松×蒙古栎混交林等。

参考文献:

[1] 林立彬,李铁华,杨柳.青冈栎混交林生物量及碳储量分布特征[J].水土保持学报,2019,33(1):139-144.

[2] Wu H, Zhang J L, Yu L F, et al. Study on water conservation capacity of litter from different types of forest in Caohai Basin [J]. Meteorological and Environmental Research, 2013, 4(12): 17-22, 26.

[3] Zheng X L, Chen L H, Gong W Y, et al. Evaluation of the water conservation function of different forest types in north-eastern China [J]. Sustainability, 2019, 11(15): 1-13.

[4] 张祯尧,孙佳美,余新晓,等.栓皮栎林下枯落物减流减沙效应研究[J].水土保持学报,2016,30(3):55-58,158.

[5] 李阳,万福绪,黄浦江中游5种典型林分枯落物和土壤水源涵养能力研究[J].水土保持学报,2019,33(2):264-271.

[6] 喻阳华,李光容,皮发剑,等.赤水河上游主要森林类型水源

涵养功能评价[J].水土保持学报,2015,29(2):150-156.

[7] 王伟伟.栓皮栎林分枯落物对土壤-植物系统水分运动的影响[J].水土保持通报,2015,35(3):105-111.

[8] 张永浩.南京城郊主要林分类型枯落物水文效应研究[D].南京:南京林业大学,2015.

[9] 陆梅,田昆,赖建东,等.高原湿地纳帕海周边山地不同植被类型枯落物持水特性[J].水土保持通报,2011,31(1):28-34,52.

[10] 刘欣,陶建平,黄茹,等.重庆石灰岩地区3种林分林下枯落物持水能力比较[J].中国生态农业学报,2008,16(3):712-717.

[11] 张增信,闵俊杰,闫少锋,等.苏南丘陵森林枯落物含水量及其影响因素分析[J].水土保持通报,2011,31(1):6-10.

[12] 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.

[13] 张长斌,赵有福,王福成.夏玛林场林下枯落物涵水能力研究[J].中国林业,2011(12):30.

[14] 杨荣,杨宏伟,刘丽英,等.不同林分山杏灌木林枯落物持水性能研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(2):96-102,110.

[15] 王美平.小五台山国家级自然保护区植被垂直分布特点[J].绿色科技,2018(6):151,155.

[16] 尤海舟,毕君,蔡蕾,等.小五台山不同林分类型林地水文效应及涵养水源生态功能价值估算[J].中国农学通报,2013,29(13):60-65.

[17] 葛龙允,喻理飞,严令斌,等.黔中喀斯特石漠化区次生林树种的经济功能评价及功能群划分[J].西部林业科学,2014,43(3):62-69.

[18] 吕宸,龚伟,车明轩,等.海拔和坡向对高寒灌丛草甸凋落物水源涵养功能的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):219-225,243.

[19] 寇萌,焦菊英,尹秋龙,等.黄土丘陵沟壑区主要草种枯落物的持水能力与养分潜在归还能力[J].生态学报,2015,35(5):1337-1349.

[20] 胡海清,陆昕,孙龙,等.气温和空气相对湿度对森林地表细小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.

[21] Flannigan M D, Wotton B M, Marshall G A, et al. Fuel moisture sensitivity to temperature and precipitation: Climate change implications [J]. Climatic Change, 2016, 134(1/2): 59-71.

[22] 杜捷.北京山区森林枯落物层水文过程模拟研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.

[23] 张运林.蒙古栎和红松凋落物含水率动态变化影响因素及预测模型研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2019.

[24] Sokolova G V, Makogonov S V. Development of the forest fire forecast method(a case study for the Far East) [J]. Russian Meteorology and Hydrology, 2013, 38(4): 222-226.

[25] 齐永峰,王文帆,郝斌,等.人工落叶松林凋落物层细小可燃物含水率模型的研究[J].防护林科技,2013(7):14-16.