

密度调控对华北落叶松人工林枯落物水文特征的影响

白英辰, 朱江, 程小琴, 韩海荣, 康峰峰, 王甜, 彭信浩

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为探究密度调控措施对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)人工林枯落物水文效应的影响, 以山西太岳山好地方林场35年生华北落叶松(*L. principis-rupprechtii*)人工林为研究对象, 采用样地调查和室内浸泡法分析了不同密度调控处理下未分解层和半分解层枯落物储量、枯落物持水特征、枯落物持水量和持水速率及其与浸水时间的关系。结果表明: (1) 4种密度调控处理枯落物储量由大到小依次为轻度密度调控处理(LT)>中度密度调控处理(MT)>重度密度调控处理(HT)>对照处理(CK), 不同强度的密度调控处理有利于林分凋落物的产生; (2) CK、LT、MT和HT的最大持水率分别为214.30%, 219.28%, 256.95%和249.50%, 最大持水量分别为125.24, 186.24, 197.68, 157.96 t/hm², 有效拦蓄量分别为56.06, 72.46, 82.59, 58.47 t/hm²; (3) 半分解层枯落物持水量均高于未分解层, 而不同密度调控处理对未分解层枯落物的持水过程影响并不显著, MT处理下半分解层枯落物持水量明显高于LT、HT和CK处理; (4) 枯落物持水速率与浸水时间之间存在明显的幂函数关系, 半分解层相对未分解层具有更强的持水能力, 不同密度调控处理对枯落物持水速率的影响并不显著。

关键词: 华北落叶松人工林; 密度调控; 枯落物; 水文特征

中图分类号:S715.7 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2016)06-0128-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.023

Effect of Thinning on Hydrological Characteristics of Forest Litter in *Larix principis-rupprechtii* Mayr Plantation

BAI Yingchen, ZHU Jiang, CHENG Xiaoqin, HAN Hairong,

KANG Fengfeng, WANG Tian, PENG Xinhao

(1. Key Laboratory of Ministry of Forest Cultivation and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to explore the effects of varying thinning intensities on litter hydrology in *Larix principis-rupprechtii* Mayr plantations, a study was conducted in Haodifang Forest Farm, Taiyue Mountains, Shanxi Province. Sample site investigation and laboratory soaking method were used to analyze litter reserves, litter water retention characteristics, litter water holding capacity and absorption rate and their relationships with soaking time for the un-decomposed litter layers and half-decomposed litter layers under different density regulations. The results showed that: (1) The litter reserves showed an order of low thinning (LT)>moderate thinning (MT)>heavy thinning (HT)>control (CK), indicating that different density control had a positive effect on forest litter production. (2) The maximum water holding rate in CK, LT, MT and HT was 214.30%, 219.28%, 256.95% and 249.50%, respectively. The maximum water holding capacity was 125.24 t/hm², 186.24 t/hm², 197.68 t/hm² and 157.96 t/hm², respectively. The effective water retaining content was as followed 56.06 t/hm², 72.46 t/hm², 82.59 t/hm² and 58.47 t/hm². (3) The water holding capacity in half-decomposed litter layers was higher than that in un-decomposed litter layers, but different density control had little effects on water holding process in un-decomposed litter layers. The water holding capacity under MT control was obviously higher than that under LT, HT and CK in half-decomposed litter layers. (4) The absorption rate and soaking time showed a power function. Half-decomposed litter layers had higher water holding capacity than un-decomposed litter layers. There was no significant difference in

litter water absorption rate among different density controls.

Keywords: *Larix principis-rupprechtii* Mayr; thinning; litter; hydrological characteristics

森林作为陆地生态系统的主体,其水源涵养功能对全球水分循环具有非常重要的作用^[1],主要体现在对大气降水的拦截、分配和滞蓄^[2],具有拦蓄洪水、削减洪峰、调节径流的功能效应^[3-4]。森林枯落物层由林分凋落的植物残体(枝、叶、花、果和树皮等)累积形成,是森林结构的重要组成部分,作为第二个水文作用层影响着森林生态系统水文过程,是森林涵养水源的主要作用层^[5]。同时,枯落物层在阻滞地表径流、减少林地蒸发、改善土壤结构和增强土壤抗冲能力等方面均具有重要作用^[6]。人工林作为世界森林资源的重要组成部分,其生态功能作用日益凸显,探讨经营措施对人工林枯落物水文特性的影响具有重要意义。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)为我国的特有树种,是我国暖温带亚高山地区的代表性森林类型,是华北地区山地针叶林主要建群种之一和人工造林的主要树种^[7]。目前对于华北落叶松(*L. principis-rupprechtii*)人工林的研究多集中在林下植被、生产力、土壤理化性质和人工林水源涵养^[8-9]等方面的研究,而针对不同密度调控下华北落叶松(*L. principis-rupprechtii*)人工林枯落物水文特征^[10]的研究鲜见报道。鉴于此,本文以不同密度调控下的华北落叶松(*L. principis-rupprechtii*)人工林为研究对象,通过对其林下枯落物层储量、持水特性、持水量和持水速率及其与浸水时间的关系分析研究,旨在获取密度调控对枯落物层水文特性的影响,为华北地区人工林生态功能研究提供基础数据,同时为该地区华北落叶松(*L. principis-rupprechtii*)人工林的经营措施提供科学支撑。

1 研究区概况

研究地位于山西省太岳山国有林管理局好地方林

场,地理坐标为东经 111°59'—112°05',北纬 36°40'—36°47',东西宽约 8 km,南北长约 12 km,海拔范围 1 700~2 450 m,林场经营总面积 45.5 km²,森林覆盖率 82.3%。该区属典型暖温带季风气候,年均气温约 6.2 °C,年积温 2 800 °C 左右,年日照时数 2 700 h,年平均降雨量 770 mm,无霜期 120 d 左右。岩石主要为石灰岩,土壤类型主要为石灰岩、砂岩母质上发育而成的淋溶褐土。植被属温带落叶阔叶林带,主要乔木树种有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)、白桦(*Betula platyphylla* Sukaczev)、辽东栎(*Quercus wutaishanica* Mayr)等;灌木主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Bunge)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)等;草本主要有细叶苔草(*Carex rigescens* (Franch.) V. I. Krecz.)、小红菊(*Dendranthema chanetii* Staph)、柳兰(*Epilobium angustifolium*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

2012 年 4 月,在好地方林场接石沟选取立地条件、栽培技术和抚育措施一致的华北落叶松人工纯林作为研究对象,共设置 25 m×25 m 规格的固定样地 12 块,并通过间伐进行 4 种不同强度的处理,分别为对照处理(CK):密度为 2 096 株/hm²,调控强度为 0%;轻度密度调控处理(LT):密度为 1 850 株/hm²,调控强度为 15%;中度密度调控处理(MT):密度为 1 415 株/hm²,调控强度为 35%;重度密度调控处理(HT):密度为 1 109 株/hm²,调控强度为 50%。2014 年 8 月对样地进行调查,样地林分特征和立地状态见表 1。

表 1 研究区样地基本情况

处理类型	平均胸径/cm	平均树高/m	密度/(株·hm ⁻²)	调控强度/%	林龄/a	坡度/(°)	坡向	坡位	海拔/m
CK	15.01±0.51	14.19±2.30	2096±64	0	35	25	北	上坡	2327
LT	14.85±0.69	14.06±2.02	1850±121	15	35	25	北	上坡	2335
MT	15.96±0.38	15.86±0.96	1415±91	35	35	23	北	上坡	2346
HT	16.81±1.26	15.41±2.22	1109±188	50	35	22	北	上坡	2340

注:平均胸径、平均树高和密度的数值为平均值±标准差。下同。

2.2 经营背景

研究区域的华北落叶松人工林在 2007 年进行一次抚育,抚育措施主要包括疏伐、打枝和集材归楞等;2012 年进行第二次抚育和密度调控处理。林内林木采伐之后,剥离枝条,移走树干,并将所有枝条集中归置。从造林起至完成林分密度调控,林内枯落物层未

作任何处理。

2.3 枯落物储量测定

2015 年 9 月在每个样地内沿对角线设置 5 个 1 m×1 m 的小样方,对林内 35 年累积的枯落物层按照未分解层和半分解层分别收集^[11],称重;然后分层混合后取样 500.0 g,带回实验室置于 65 °C 的烘箱中

烘干至恒重,获得样品干重,计算样品含水率,并推算出单位面积枯落物储量。

2.4 枯落物持水过程测定

采用室内浸泡法^[12]测定枯落物持水量。将不同处理(CK、LT、MT、HT)和不同层次(未分解、半分解)的枯落物分别装入80目尼龙袋,每个样品重复3次,然后将其置于清水中浸泡0.5,1.0,1.5,2.0,4.0,6.0,8.0,10.0,24.0 h。每次浸泡结束后,将尼龙袋取出静置5~10 min直到不再滴水后称重。浸水不同时间后的枯落物湿重与干重之差即为枯落物样品的持水量(浸水24 h后的持水量作为枯落物的最大持水量);持水量与浸水时间的比值为枯落物不同时间下的持水速率;持水量与样品干重的比值为持水率,浸水24 h后的持水率作为最大持水率,此时湿重与干重之比为枯落物最大吸湿比,用来反映枯落物持水力大小^[13]。

自然状况下枯落物通常不会达到最大持水量,本文采用有效拦蓄量来反映枯落物对降雨的实际拦蓄情况^[14],计算公式为:

$$W = (0.85R_m - R_0)M$$

式中:W为有效拦蓄量(t/hm²);R₀为自然含水率(%);R_m为最大持水率(%);M为枯落物干重(t/hm²)。

2.5 数据处理

根据野外调查的资料和实验室分析所得数据,采用EXCEL 2013和SPSS 20.0统计分析软件进行数据统计处理和分析。

3 结果与分析

3.1 枯落物储量

3种不同强度密度调控处理枯落物总储量均大于对照处理,由大到小依次为LT(80.53 t/hm²)>MT(69.98 t/hm²)>HT(60.44 t/hm²)>CK(55.07 t/hm²),且未分解层和半分解层的枯落物储量均呈现出相同的规律(表2)。枯落物总储量中LT处理显著高于HT和CK($P<0.05$),而未分解层枯落物储量的不同处理中LT和MT均显著高于CK处理($P<0.05$);在半分解层枯落物储量的不同处理间差异均不显著($P>0.05$)。

3.2 枯落物水文效应

对不同密度调控林分的枯落物持水特征分析结

果表明(表3),枯落物最大持水率范围为214.30%~256.95%,即最大可吸持约为自身干重2.1~2.5倍的水分,LT、MT和HT均高于CK,且随着密度调控强度的增加呈现先增加后降低的变化趋势;半分解层的最大持水率均高于未分解层,说明相同重量的枯落物半分解层相比未分解层能吸收更多的水分。不同密度调控处理中枯落物最大持水量范围为125.24~197.68 t/hm²,LT、MT和HT均高于CK,由大到小依次为MT(197.68 t/hm²)>LT(186.24 t/hm²)>HT(157.96 t/hm²)>CK(125.24 t/hm²);半分解层的最大持水量也均高于未分解层。综合枯落物最大持水率和最大持水量的结果,可以发现密度调控均能提高林分枯落物的最大持水能力,且MT林分枯落物最大持水能力最大;半分解层相比未分解层具有更优的持水能力。

表2 不同密度调控强度林分的枯落物储量

处理 类型	未分解层		半分解层		枯落物总储量/ (t·hm ⁻²)
	储量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	储量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	
CK	12.87±2.48b	23.46	42.20±6.49a	76.54	55.07±7.19b
LT	22.88±2.66a	29.29	57.65±14.82a	70.71	80.53±15.11a
MT	20.43±5.70a	29.85	49.55±12.48a	70.15	69.98±9.76ab
HT	16.78±3.51ab	27.73	43.66±5.92a	72.27	60.44±7.42b

注:同列数据后不同小写字母表示差异性显著($P<0.05$)。下同。

不同密度调控林分枯落物层的有效拦蓄量变化范围为56.06~82.59 t/hm²(表3),且与最大持水量表现出相同规律,大小排序依次为:MT(82.59 t/hm²)>LT(72.46 t/hm²)>HT(58.47 t/hm²)>CK(56.06 t/hm²),且不同密度调控林分的半分解层有效拦蓄量均大于未分解层,说明半分解层在降雨拦蓄过程中起到重要作用。

不同密度调控林分枯落物的最大吸湿比(表3)由大到小依次为:MT(3.57)>HT(3.50)>LT(3.19)>CK(3.14),表明MT林分枯落物层能吸持比自身更多的水分。就不同密度调控林分枯落物未分解层而言,最大吸湿比变化范围为2.89~3.36,大小排序为:HT(3.36)>MT(2.96)>LT(2.94)>CK(2.89)。在半分解层中,MT林分枯落物的吸湿比最大,其次为HT和LT处理,CK枯落物半分解层吸湿比最小,为3.40。不同密度调控林分枯落物半分解层的最大吸湿比均大于未分解层。

表3 不同密度调控林分枯落物持水特征

处理 类型	最大持水率/%			最大持水量/(t·hm ⁻²)			有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)			最大吸湿比		
	未分 解层	半分 解层	平均	未分 解层	半分 解层	平均	未分 解层	半分 解层	平均	未分 解层	半分 解层	平均
CK	189.06	239.54	214.30	24.16	101.08	125.24	15.42	40.64	56.06	2.89	3.40	3.14
LT	194.00	244.55	219.28	45.30	140.94	186.24	25.65	46.81	72.46	2.94	3.45	3.19
MT	195.84	318.06	256.95	41.49	156.19	197.68	24.27	58.32	82.59	2.96	4.18	3.57
HT	236.42	262.58	249.50	35.63	122.34	157.96	16.42	42.05	58.47	3.36	3.63	3.50

最大持水量与储量呈显著相关性($P<0.05$),且最大持水量和有效拦蓄量也呈显著相关性($P<0.05$),最大持水量与有效拦蓄量呈极显著相关($P<0.01$),最大持水量与最大吸湿比均呈极显著相关($P<0.01$),有效拦蓄量与最大吸湿比呈极显著相关($P<0.01$),储量与最大吸湿比并无显著相关性($P>0.05$)(表4)。

表4 枯落物储量、最大持水量、有效拦蓄量和最大吸湿比的相关性分析

项目	最大持水量	有效拦蓄量	最大吸湿比
储量	0.805*	0.735*	0.448
最大持水量		0.971**	0.885**
有效拦蓄量			0.880**

注: * 表示 $P<0.01$; * 表示 $P<0.05$ 。

3.3 枯落物持水过程

3.3.1 枯落物持水量与浸水时间的关系 不同层次枯落物在不同浸水时间下的持水量分布规律见图1,枯落物持水量与浸水时间的关系见表5。不同密度调控处理下的枯落物持水量均在浸水前期迅速增加,然后随着浸水时间的增加,枯落物持水量逐渐达到饱和,

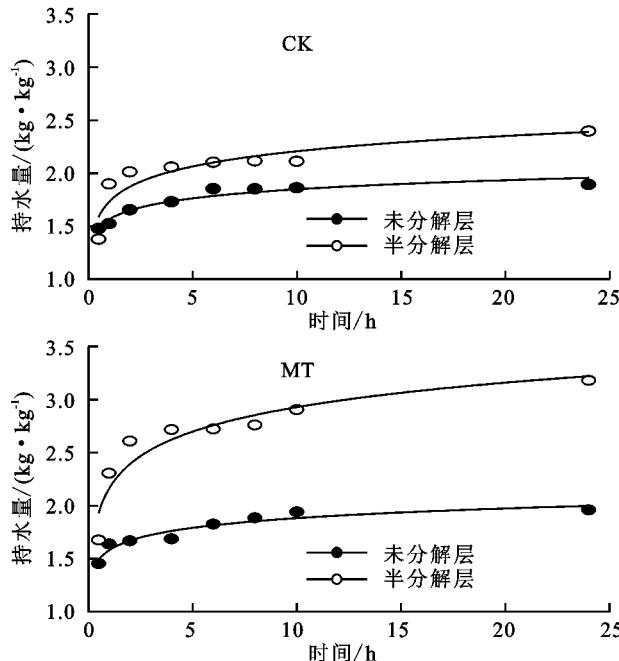


图1 不同密度调控林分枯落物持水过程

表5 不同密度调控林分枯落物持水量与浸水时间关系

处理	未分解层			半分解层		
	类型	关系式	R^2	关系式	R^2	
CK		$Q=0.1236\ln(t)+1.5632$	0.9680	$Q=0.2076\ln(t)+1.7284$	0.9087	
LT		$Q=0.1214\ln(t)+1.5897$	0.9687	$Q=0.1374\ln(t)+1.9563$	0.9085	
MT		$Q=0.1318\ln(t)+1.5794$	0.9613	$Q=0.3337\ln(t)+2.1607$	0.9445	
HT		$Q=0.0975\ln(t)+1.7473$	0.9798	$Q=0.2579\ln(t)+1.8519$	0.9334	

3.3.2 枯落物持水速率与浸水时间关系 在枯落物浸水过程中,不同密度调控处理林分的各层枯落物持水速率变化见图2,4种处理和各层的枯落物持水速率与浸水时间之间存在明显的幂函数关系(表6)。随着枯落物浸水时间的增加,其持水速率迅速下降,待枯落物持水

持水量变化逐渐趋于平缓,枯落物持水量和浸水时间两者间存在显著的对数相关关系,相关系数均达到了0.9以上(表5)。比较不同分解程度的枯落物持水过程可以发现,4种不同密度调控林分中,单位质量下的半分解层的持水量在不同时段均显著高于未分解层,且持水过程中持水量由迅速增加到趋于平缓的拐点较未分解层滞后,说明未分解层枯落物相对半分解层更容易达到饱和,这可能是由于枯落物经过一定时间的分解后,其表面积增加、内部结构改变和亲水性更强而造成持水量增加。可见,半分解层比分解层能吸收更多的水分,能有效吸收水分的时间更长。

在不同密度调控处理之间未分解层的持水过程变化规律较为一致,并无明显差异,未分解层枯落物大致在5 h左右基本达到饱和状态。然而,不同密度处理下的半分解层枯落物持水过程变化规律存在一定差异,MT处理单位质量的半分解层枯落物持水量明显高于其他3种处理,HT处理略高于LT和CK,而LT和CK之间差异并不明显。

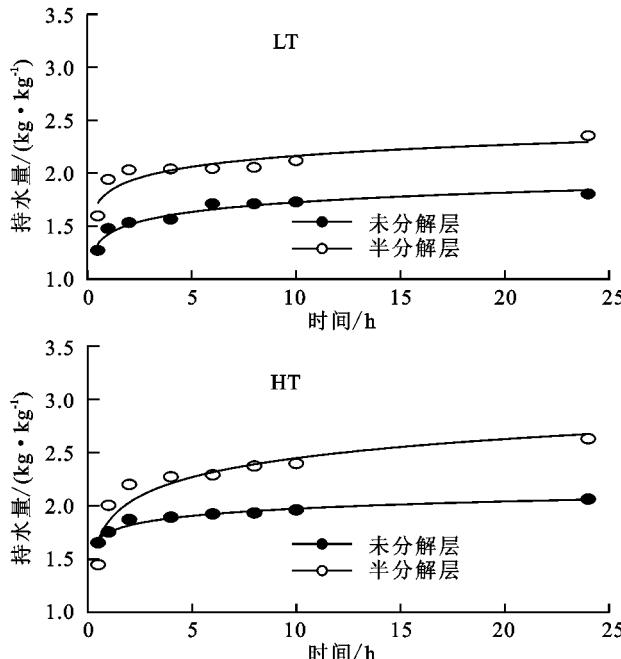


图2 不同密度调控林分枯落物持水速率

量达到饱和后,持水速率逐渐接近于零。然而,在枯落物持水速率变化的过程中,未分解层和半分解层之间存在一定的差异。其中,半分解层在浸水0.5~2 h间的持水速率均高于未分解层;随着浸水时间的增加,半分解层持水速率下降的速度均低于未分解层,即半分解层能

维持更长时间相对较高的吸水速率,能吸收更多的水分,吸水能力更强,与持水量的分析结果相符。

4 种不同密度调控处理下的未分解层和半分解

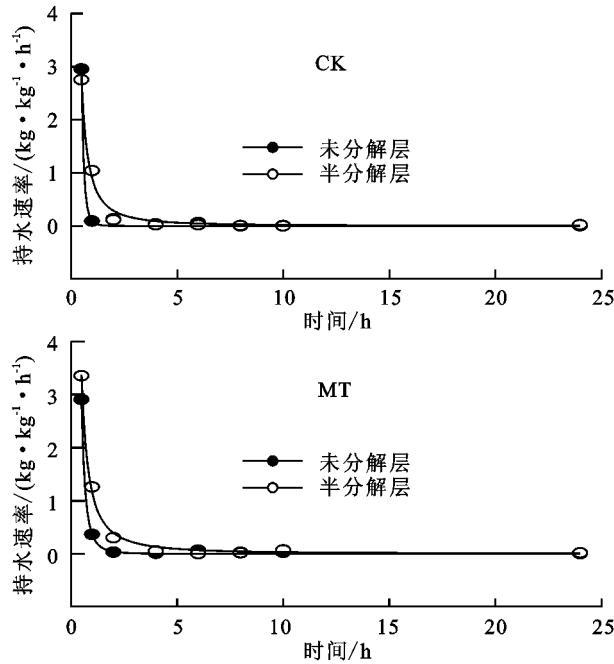


图 2 不同密度调控林分枯落物层持水速率

表 6 不同密度调控林分枯落物持水速率与时间关系

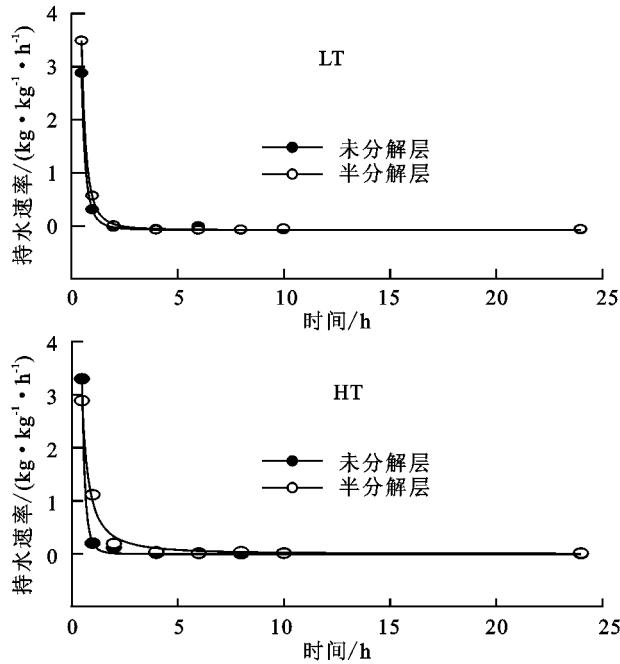
处理 类型	未分解层		半分解层	
	关系式	R ²	关系式	R ²
CK	$R = 0.0989t^{-4.8995}$	0.9985	$R = 0.8963t^{-1.6311}$	0.9955
LT	$R = 0.3809t^{-2.9285}$	0.9997	$R = 0.6213t^{-2.4940}$	0.9999
MT	$R = 0.3640t^{-2.9977}$	0.9995	$R = 1.1540t^{-1.5466}$	0.9982
HT	$R = 0.2156t^{-3.9353}$	0.9994	$R = 0.9842t^{-1.5650}$	0.9969

4 结论与讨论

枯落物层是森林涵养水源作用的主要作用层,林分水源涵养能力与枯落物储量呈正相关关系^[15],枯落物储量的增加一定程度上有助于林分水源涵养能力的提高。枯落物储量与林分结构以及生长发育状况有关,还受到自身分解状况和累积年限的直接影响^[16]。在本文中,枯落物储量与李良等^[17]的研究结果相近,高于莫菲等^[18]的研究结果,差异可能与林分结构和林龄直接相关。另外,本文进行密度调整的林分的枯落物储量均高于 CK,然而随着密度调整强度的增加,有利于林分枯落物产生的效应逐渐减小,这可能与林分密度降低之后,林木竞争减小,枝叶生长与更新加快,一定程度上促进了林分凋落物的产生,然而随着密度调控强度的增加,林木的减少降低了林分枯落物的产量。可见,密度调控处理对林分枯落物产量的影响并不是单一的,LT 枯落物产量更高,水源涵养能力更强。

枯落物层的持水能力是森林下层水文功能的重要组成部分,是整个森林生态系统水循环中的重要环节,是反映枯落物层水文作用的重要指标^[14]。枯落物持水能力高低因林分类型、林龄、自身结构及分解

层枯落物的持水速率变化规律无明显差异;未分解层在浸水 2 h 左右,其持水速率达到最低,基本接近于零,而半分解层在 5 h 左右持水速率达到最低。



程度不同而存在差异^[19]。本文中密度调整的林分枯落物持水能力均大于 CK,其中 MT 最为明显,其原因可能与密度调控处理导致林分凋落物种类和分解速率的改变有关。同时,对不同分解程度枯落物的水文效应的分析中发现,半分解层枯落物的持水能力要优于未分解层,这与分解过后的枯落物结构变化、亲水面积增加等直接相关。

在对枯落物持水过程的研究中,多数学者的研究表明,枯落物持水量和持水速率与浸水时间分别呈对数函数和幂函数的关系^[6,20],本文的研究结果也显示出相同的规律,且拟合效果良好。半分解层的持水量要显著高于未分解层,且达到饱和时间相对滞后,可见半分解层能吸收更多水分,且能有效吸收水分的时间更长;不同密度调控处理下,MT 处理半分解层枯落物持水量要优于其他 3 种处理。对于持水速率在不同浸水时间下的变化规律中,半分解层相对分解层维持较高持水速率的时间更长,说明其对降水有着更强的拦截能力,这与持水量的分析结果一致;然而,不同密度调控处理对持水速率的影响并不显著。

密度调控在一定程度上能提高林分枯落物的产量,有助于枯落物持水能力的提高,而枯落物不同分解层间水文效应的差异明显。对于不同密度调控处理对华北落叶松(*L. principis-rupprechtii*)人工林枯落物种类和分解的影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 韩海荣,康峰峰,程小琴,等.基于森林生态系统管理的

- 人工林多功能经营技术研究[M].北京:中国林业出版社,2015:56-78.
- [2] 王晓学,沈会涛,李叙勇,等.森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J].生态学报,2013,33(4):1019-1030.
- [3] 曹云,欧阳志云,郑华,等.森林生态系统的水文调节功能及生态学机制研究进展[J].生态环境,2006,15(6):1360-1365.
- [4] 郭梦娇,朱江,程小琴,等.辽河源不同林龄油松林水源涵养能力研究[J].水土保持学报,2016,34(4):65-69.
- [5] 王波,张洪江,徐丽君,等.四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究[J].水土保持学报,2008,22(4):90-94.
- [6] 于晓文,宋小帅,康峰峰,等.辽河源典型森林群落下枯落物的水文特性[J].水土保持通报,2014,34(4):65-69.
- [7] 姚延椿,陈建中,胡建芳.华北落叶松[M].北京:中国农业科学技术出版社,2013.
- [8] 王卫军,赵婵璞,姜鹏,等.塞罕坝华北落叶松人工林水源涵养功能研究[J].中南林业科技大学学报,2013,32(2):66-68.
- [9] 张光灿,周泽福,刘霞,等.五台山华北落叶松水源涵养林密度结构与生长动态[J].中国水土保持科学,2007,5(1):1-6.
- [10] 陈波,孟成生,赵耀新,等.冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(3):216-221.
- [11] 王士永,余新晓,贾国栋,等.北京山区主要人工林枯落物水文效应[J].中国水土保持科学,2011,9(5):42-47.
- [12] 张峰,彭祚登,安永兴,等.北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J].林业科学,2010,46(10):6-14.
- [13] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土丘陵区典型植被枯落物持水性能空间变化特征[J].水土保持学报,2015,29(3):225-230.
- [14] 王甜,康峰峰,韩海荣,等.山西太岳山油松人工幼龄林水源涵养能力对密度调控的响应[J].水土保持学报,2015,29(2):133-138.
- [15] 张伟,杨新兵,张汝松,等.冀北山地不同林分枯落物及土壤的水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2011,31(3):208-212.
- [16] 杨曾奖,曾杰,徐大平,等.森林枯枝落叶分解及其影响因素[J].生态环境,2007,16(2):649-654.
- [17] 李良,翟洪波,姚凯,等.不同林龄华北落叶松人工林枯落物储量及持水特性研究[J].中国水土保持,2010,27(3):32-34.
- [18] 莫菲,于澎涛,王彦辉,等.六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程[J].生态学报,2009,29(6):2868-2876.
- [19] 周彬,韩海荣,康峰峰,等.太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征[J].生态学报,2013,33(5):1645-1653.
- [20] 贺宇,丁国栋,梁文俊,等.林分密度对枯落物层持水特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(4):68-72.

(上接第 78 页)

- [3] 熊康宁,李晋,龙明忠,等.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
- [4] 王计平,杨磊,卫伟,等.黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响:景观水平与多尺度比较[J].生态学报,2011,31(19):5531-5541.
- [5] 刘世梁,安南南,尹艺洁,等.基于 SWAT 模型的澜沧江中游小流域水土流失与 NDVI 时空动态相关性[J].水土保持学报,2016,30(1):62-67.
- [6] 李月臣,刘春霞,赵纯勇,等.三峡库区重庆段水土流失的时空格局特征[J].地理学报,2008,63(5):502-513.
- [7] 梁音,张斌,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):22-27.
- [8] 李阳兵,邵景安,王世杰,等.基于岩溶生态系统特性的水土流失敏感性评价[J].山地学报,2007,25(6):671-677.
- [9] 王娇,程维明,祁生林,等.基于 USLE 和 GIS 的水土流失敏感性空间分析:以河北太行山区为例[J].地理研究,2014,33(4):614-624.
- [10] 同利会,周忠发,王媛媛.丹霞地区水土流失遥感评价及空间分异:以贵州省赤水市为例[J].湖北农业科学,2012,51(20):4491-4495.
- [11] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分级分类标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [12] 方广玲,香宝,赵卫,等.基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2015,29(3):6-12.
- [13] 蔡宏,何政伟,安艳玲,等.基于 RS 和 GIS 的赤水河流域植被覆盖度与各地形因子的相关强度研究[J].地球与环境,2014,42(4):518-524.
- [14] 伍光和,王乃昂,胡双熙,等.自然地理学[M].第 4 版.北京:高等教育出版社,2008.
- [15] 王莉雯,卫亚星,牛铮.基于遥感的青海省植被覆盖时空变化定量分析[J].环境科学,2008,29(6):1754-1760.
- [16] Ostendorf B, Reynolds J F. A model of arctic tundra vegetation derived from topographic gradients [J]. Landscape Ecology, 1998, 13(3): 187-201.
- [17] 胡世雄,靳长兴.坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究[J].地理学报,1999,54(4):347-356.