

关帝山不同林分结构华北落叶松林枯落物水文效应

梁文俊, 魏 曦, 赵伟文, 冯燕辉, 卜瑞瑛, 王凯娜

(山西农业大学林学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 为研究北方山区典型人工林水源涵养效应和更新状况, 选取吕梁山落叶松纯林为研究对象, 采用室内浸水法测定不同林分密度下枯落物的持水性能, 用 RDA 冗余度分析法探究林分结构对枯落物厚度和拦蓄功能的相关关系。结果表明: (1) 不同密度华北落叶松样地的枯落物厚度为 0.84~4.50 cm, 蓄积量范围为 9.64~24.14 t/hm², 350 株/hm² 样地蓄积量最大, 200 株/hm² 样地最小。 (2) 样地最大持水量范围为 27.12~62.07 t/hm², 500 株/hm² 样地持水量最大, 150 株/hm² 样地最小, 持水率范围为 213%~374%; 有效拦蓄量为 10.75~30.40 t/hm², 500 株/hm² 样地拦蓄能力最佳, 150 株/hm² 样地最差, 拦蓄能力与持水力呈正相关。 (3) 枯落物的持水量与浸水时间呈显著对数函数关系, 吸水速率与浸水时间呈幂指数函数关系。 (4) 枯落物拦蓄量与林分结构关系密切, 影响排序为树高>密度>郁闭度>坡度>林龄>更新>抚育年限。其中, 树高与枯落物的拦蓄量关系最为密切, 林龄、苗木更新、抚育年限对枯落物拦蓄能力影响较小, 海拔和林分平均胸径对枯落物拦蓄基本没有影响。研究结果可从水源涵养和水土保持视角为华北落叶松人工纯林的抚育管理提供一定的参考依据。

关键词: 枯落物; 林分结构; 关帝山; 水源涵养

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0324-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.043

Hydrological Effects of Litter Under Different Forest Structures of *Larix principis* in Guandi Mountain

LIANG Wenjun, WEI Xi, ZHAO Weiwen, FENG Yanhui, BU Ruiying, WANG Kaina

(College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to study the water conservation effect and regeneration of typical plantations in northern mountainous, *Larix principis* forests in the Lüliang Mountains were selected. The indoor soaking method was used to determine the water holding capacity of litter under different densities. The RDA analysis method was used to explore the relationships between stand structure and litter thickness and interception function. The results showed that: (1) The thickness of litter was 0.84~4.50 cm in different densities, and the accumulation was in the range of 9.64~24.14 t/hm². 350 trees/hm² had the largest amount and 200 trees/hm² had the smallest. (2) The maximum water holding capacity of the sample plots was 27.12~62.07 t/hm², the water holding capacity of 500 trees/hm² was the largest, the water holding capacity of 150 trees/hm² was the smallest, and the water holding rate ranged from 213% to 374%. The effective interception capacity of each plot was 10.75~30.40 t/hm², the interception capacity of 500 trees/hm² was the best, and 150 trees/hm² was the worst. The interception capacity was positively correlated with water holding capacity. (3) The water holding capacity of litter had a significant logarithmic function relationship with the soaking time, and the water-holding rate had a power exponential function relationship with the soaking time. (4) The intercepted amount of litter was closely related to the structures of the forest, showing as tree height>forest density>canopy density>slope>forest age>regeneration>tending thinning years. Tree height had the closest relationship to the intercepted amount of litter. The effects of forest age, seedling

收稿日期: 2020-09-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(31901365, 31971644, 31500523); 山西省优秀博士来晋工作奖励资金科研项目(SXYBK Y2018032); 山西农业大学科技创新基金项目(2018YJ09)

第一作者: 梁文俊(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土保持、林业生态等研究。E-mail: liangwenjun123@163.com

通信作者: 魏曦(1986—), 女, 博士, 主要从事水土保持、林业生态等研究。E-mail: weixi0826@163.com

regeneration and tending years on litter interception were small. Altitude and average DBH of stand had no effect on litter interception. The results of the study could provide some references for tending and management of *Larix principis* plantation from the perspectives of water conservation and soil and water conservation.

Keywords: litter; stand structure; Guandi Mountain; water conservation

森林在陆地生态系统中占有极其重要的地位,尤其在涵养水源、水土保持、防风固沙及净化空气等方面发挥着至关重要的作用^[1-3]。森林水文效应是全球水文循环的一个重要环节,林冠截留、树干茎流、枯落物持水拦蓄、土壤入渗及林地蒸发等均参与森林水文过程^[4-6]。地上部分枯落物的水文功能占据重要的地位,枯落物主要指乔、灌、草凋落或者死亡的枝、叶、花、果实等代谢物的总称,有减少林地蒸发、拦蓄降水、维持地温、提供养分等作用^[7-8]。在水土保持方面,枯落物能有效降低雨滴对地面直接冲击、拦水蓄水、减缓地表径流、拦截泥沙等功效^[9-10]。因此,研究枯落物的水文效应有极其重要的作用。

枯落物具有持水和拦蓄的能力,不同地区、地形、海拔、森林类型以及枯落物厚度、分解度、林地环境和人为干扰等众多因素都会影响枯落物的水文功效。郝弯弯等^[11]对河北围场御道口牧场 4 种防护林下枯落物水文效应进行研究显示,该地区华北落叶松林分枯落物持水拦蓄能力最佳;吴晓光等^[12]分析了鄂尔多斯砒砂岩区 6 种造林树种枯落物的持水性能表明,6 种林分中典型抗旱树种油松和侧柏枯落物的蓄水能力最好;杨家慧等^[13]调查了安顺市平坝区不同林龄柳杉人工林枯落物水源涵养能力得出,柳杉林枯落物有效拦蓄能力随林龄增大不断增强;刘一霖等^[14]研究了川西高原峡谷区 6 中林分枯落物的水文效应显示,亮叶桦—青麸杨林混交林枯落物拦蓄能力最好;袁秀锦等^[15]从林分结构角度探讨了马尾松枯落物的水文效应表明,马尾松林分密度、叶面积指数、林木竞争指数与枯落物有效拦蓄量呈正相关关系($P < 0.05$)。

华北落叶松是我国北方主要针叶树种之一,具有生长快、木材品质好、耐贫瘠和干旱等优点。目前,华北落叶松主要以人工林为主,林下自然更新困难,一些研究^[16-17]提出较厚的枯落物阻碍了种子的萌发和幼苗生长,枯落物是限制华北落叶松更新的一个主要因素。本研究以华北落叶松更新苗数量为依据,设置 8 块不同林分密度、林龄、抚育年限、坡度、海拔的华北落叶松纯林样地,调查样地基本信息、枯落物分解度和厚度,测定和分析样地枯落物持水和拦蓄功能,并利用 RDA 分析法构建林分结构指标与枯落物的关系。本研究可为研究区森林水源涵养功能和水土保持提供一定的理论依据,也为华北落叶松人工纯林自然更新提出新的思路和方法。

1 研究区概况

研究地点位于山西省吕梁市交城县庞泉沟关帝山森林带的高海拔区域,该地区属温带大陆性气候,冬季长,夏季短,温暖多雨。年平均气温为 4.3℃。沿海拔梯度年平均降水量 600~822 mm。最低气温和最高气温通常在 1 月(-10.2℃)和 7 月(17.5℃),6—9 月是植物主要生长期。土壤主要为褐土和棕壤土,平均厚度为 70~80 cm。研究区植被丰富,乔木树种主要有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)、云杉(*Picea asperata* Mast.)、辽东栎(*Quercus wutaishanica* Blume)等。灌木有华北绣线菊(*Spiraea fritschiana* Schneid.)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、悬钩子(*Rubus corchorifolius* L.f.)、美蔷薇(*Rosa bella* Rehd. et Wils)等,草本主要有早熟禾(*Poa annua* Linn.)、舞鹤草(*Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt)、苔草(*Carex* spp.)、铃兰(*Convallaria majalis* Linn.)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

2020 年 7—8 月在庞泉沟实地勘察,选择华北落叶松集中更新区域进行调查。以华北落叶松林分密度、抚育年限和更新苗数量为依据,共设置不同密度梯度样地 8 块,每块面积 30 m×30 m。详细调查样地的各项基础指标,具体包括地形指标:海拔、坡度、坡向;林分指标:乔木胸径、树高、冠幅、郁闭度;苗木更新状况、灌木种类、高度、冠幅;草本种类、盖度、生物量,以及枯落物、土壤等指标。样地基本情况见表 1。

2.2 枯落物调查

在每个样地上、中、下坡各选取 1 个 30 cm×30 cm 的小样方,去除小样方内的草本,判别未分解和半分解枯落物层,测量各层厚度后,分别收集到自封袋称重,带回实验室烘干测定自然含水量和蓄积量。

$$W_0 = M_0 - M \quad (1)$$

式中: W_0 为枯落物自然含水量(g); M_0 为鲜重(g); M 为烘干后的重量(g)。

枯落物持水特性采用浸泡法测定。将烘干后的枯落物浸入水中,在 0.25,0.5,1,2,4,8,12,24 h 后称重,研究每个时段枯落物的吸水状况,计算枯落物单位面积的吸水速率、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量。

表 1 样地基本情况

样地号	密度/ (株·hm ⁻²)	林龄/ a	抚育 年限/a	郁闭度	坡度/ (°)	海拔/ m	平均 胸径/cm	平均 树高/m	更新 状况
1	100	65	30	0.1	32	1990	25.2	20.3	有
2	150	45	12	0.1	8	1981	26.1	13.5	有
3	200	64	35	0.3	24	2054	41.7	16.8	无
4	250	50	12	0.2	23	2060	31.5	17.8	大量
5	350	56	14	0.4	21	2107	33.2	26.9	无
6	450	50	11	0.6	20	2079	30.1	30.9	少量
7	500	62	15	0.4	11	2075	31.4	28.7	少量
8	625	59	11	0.7	18	2078	30.7	16.8	无

枯落物含水量和持水率计算：

$$M_h=M_t-M$$
$$R_h=(M_t-M)/M\times100\%$$

式中： M_h 为枯落物持水量(g)； R_h 为枯落物持水率(%)； M_t 为浸水 t 小时后枯落物的重量(g)； M 为枯落物烘干的干重(g)。

枯落物最大拦蓄量和有效拦蓄量计算：

$$W_m=(R_{24}-R_0)\times M_0$$
$$W_{\text{有效}}=(0.85\times R_{24}-R_0)\times M_0$$

式中： W_m 为枯落物最大拦蓄量(t/hm²)； $W_{\text{有效}}$ 为枯落物有效拦蓄量(t/hm²)； R_{24} 为枯落物最大持水率(%)； R_0 为枯落物自然含水率(%)； M_0 为枯落物蓄积量(t/hm²)；0.85 为有效拦蓄系数。

3 结果与分析

3.1 枯落物蓄积量分析

由表 2 可知,8 块不同密度华北落叶松样地枯落物总厚度为 0.84~4.50 cm,4 号样地枯落物最厚,2 号样地最薄。枯落物总蓄积量为 9.64~24.14 t/hm²,依次为 5 号样地(24.14 t/hm²)>4 号样地(23.73 t/hm²)>7 号样地(23.01 t/hm²)>6 号样地(21.35 t/hm²)>8 号样地(15.86 t/hm²)>1 号样地(11.87 t/hm²)>2 号样地(10.01 t/hm²)>3 号样地(9.64 t/hm²)。8 块样地半分解层的蓄积量均高于未分解层,其中 1 号样地枯落物半分解层占比最高(66.89%),最低为 3 号样地(51.87%),未分解层和半分解层的蓄积量与枯落物厚度均呈正比例关系。

样地	枯落物厚度/cm		蓄积量/(t·hm ⁻²)		蓄积量占比/%	
	未分解层	半分解层	未分解层	半分解层	未分解层	半分解层
1	1.17±0.29ab	1.50±0c	3.93±1.05b	7.94±2.68b	11.87	33.11
2	0.37±0.06bc	0.47±0.06c	3.97±1.46b	6.04±1.80b	10.01	39.66
3	0.80±0.61bc	1.00±0.87c	4.64±0.63b	5.00±1.08b	9.64	48.13
4	1.50±0a	3.00±0a	9.80±0.74a	13.93±0.80a	23.73	41.30
5	1.17±0.29ab	2.50±0bc	9.04±1.42ab	15.10±3.06a	24.14	37.45
6	1.00±0ab	3.00±0b	7.59±2.11ab	13.76±4.57a	21.35	35.55
7	1.07±0.40ab	2.43±1.50bc	9.28±5.77a	13.74±5.46a	23.01	40.29
8	1.00±0ab	2.67±0.29b	7.59±3.48ab	8.27±1.81b	15.86	47.86

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示各样间差异显著($P<0.05$)。下同。

3.2 枯落物持水特性分析

蓄积量、分解度、组成等因素决定枯落物的持水性能。由表 3 可知,8 块不同密度样地枯落物最大持水量为 7 号样地(62.07 t/hm²)>6 号样地(54.20 t/hm²)>5 号样地(51.88 t/hm²)>4 号样地(50.44 t/hm²)>8 号样地(49.96 t/hm²)>1 号样地(44.40 t/hm²)>3 号样地(33.71 t/hm²)>2 号样地(27.12 t/hm²)。8 块样地未分解层的最大持水量中,1,3,4,5,6,7,8 号样地之间差异不显著($P<0.05$),2,3 号样地差异不显著($P<0.05$),与其他 6 块样地有显著差异;半分解层中的最大持水量中,5,6,7 号样地之间无显著差异($P<0.05$),1,3,4,5,6,8 号样地无显著差异($P<0.05$)。各样地持水率排序为 1 号样地(374%)>6 号样地(328%)>8 号样地(315%)>3 号样地(290%)>2 号样地(271%)>7 号样地(270%)>5 号样地(215%)>4 号样地(213%),2,7 号样地最大持水率基本一致。

林地枯落物的水源涵养功效主要体现在枯落物的最大拦蓄量和有效拦蓄量 2 个方面。研究区 8 块不同

密度样地最大拦蓄量范围为 14.82~39.71 t/hm²,排序为 7 号样地(39.71 t/hm²)>6 号样地(37.28 t/hm²)>5 号样地(34.60 t/hm²)>8 号样地(30.09 t/hm²)>1 号样地(29.20 t/hm²)>4 号样地(29.06 t/hm²)>3 号样地(21.67 t/hm²)>2 号样地(14.82 t/hm²),且最大拦蓄量与最大持水量呈线性正比关系。6,1,4,

5,8 号样地的未分解层最大拦蓄量无显著差异($P<0.05$),7,3,2 号样地之间差异不显著($P<0.05$);半分解层的最大拦蓄量中,7,6,5 号样地相互无显著差异($P<0.05$),1,2,3,4,8 号之间差异不显著($P<0.05$)。样地有效拦蓄量与最大拦蓄量变化趋势一致,范围为 10.75~30.40 t/hm²。

表 3 不同林分密度下枯落物持水能力

样地	最大持水量/(t·hm ⁻²)		总最大持水量/(t·hm ⁻²)	总持水率/%	最大拦蓄量/(t·hm ⁻²)		总最大拦蓄量/(t·hm ⁻²)	有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)		总有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)
	未分解层	半分解层			未分解层	半分解层		未分解层	半分解层	
1	17.44±4.59a	26.96±6.42bc	44.40	374	14.37±4.40ab	14.83±4.71b	29.20	11.76±3.71a	10.79±3.84b	22.55
2	10.96±2.93b	16.16±2.36c	27.12	271	5.86±1.28b	8.96±1.62b	14.82	4.21±0.90b	6.54±1.40b	10.75
3	12.70±1.99ab	21.01±9.05bc	33.71	290	8.96±1.26b	12.71±6.09b	21.67	7.05±0.97ab	9.56±4.73b	16.61
4	20.87±1.21a	29.57±4.92b	50.44	213	11.81±2.78ab	17.25±4.32b	29.06	8.68±2.61ab	10.48±3.64b	19.16
5	17.38±1.79a	34.50±1.25ab	51.88	215	12.19±1.21ab	22.41±0.81ab	34.60	9.58±1.47ab	17.24±0.91ab	26.82
6	20.19±1.39a	34.01±7.97ab	54.20	328	14.61±1.85a	22.67±4.62ab	37.28	11.59±1.67a	17.57±3.50ab	29.16
7	19.55±5.59a	42.52±6.34a	62.07	270	9.09±4.97b	30.62±9.32a	39.71	6.16±4.88b	24.24±8.55a	30.40
8	21.27±5.16a	28.69±10.89b	49.96	315	13.82±4.03ab	16.27±6.97b	30.09	10.62±3.26ab	11.97±5.34b	22.59

枯落物的持水过程一定程度上反映森林对雨强较大降水的拦蓄能力,枯落物吸水速率越高,短时截水效果越好。由图 1 可知,各样地未分解层和半分解层持水量均随时间推移呈增大趋势,在前 2 h 吸水量急速上升,2~8 h 吸水量逐步缓和,8~24 h 吸水量基本处于稳定状态,达到最大持水量。8 块不同密度样地的未分解层持水能力表现为 3 号样地>5 号样

地>1 号样地>2 号样地>4 号样地>6 号样地>8 号样地>7 号样地,半分解层持水能力表现为 1 号样地>4 号样地>2 号样地>3 号样地>5 号样地>6 号样地>8 号样地>7 号样地,6,8,7 号样地未分解层和半分解层的持水能力基本一致,其他样地未分解层和半分解层持水能力表现差异较为明显。各样地枯落物的吸水速率与浸水时间呈幂指数函数关系($v=kt^n$)。

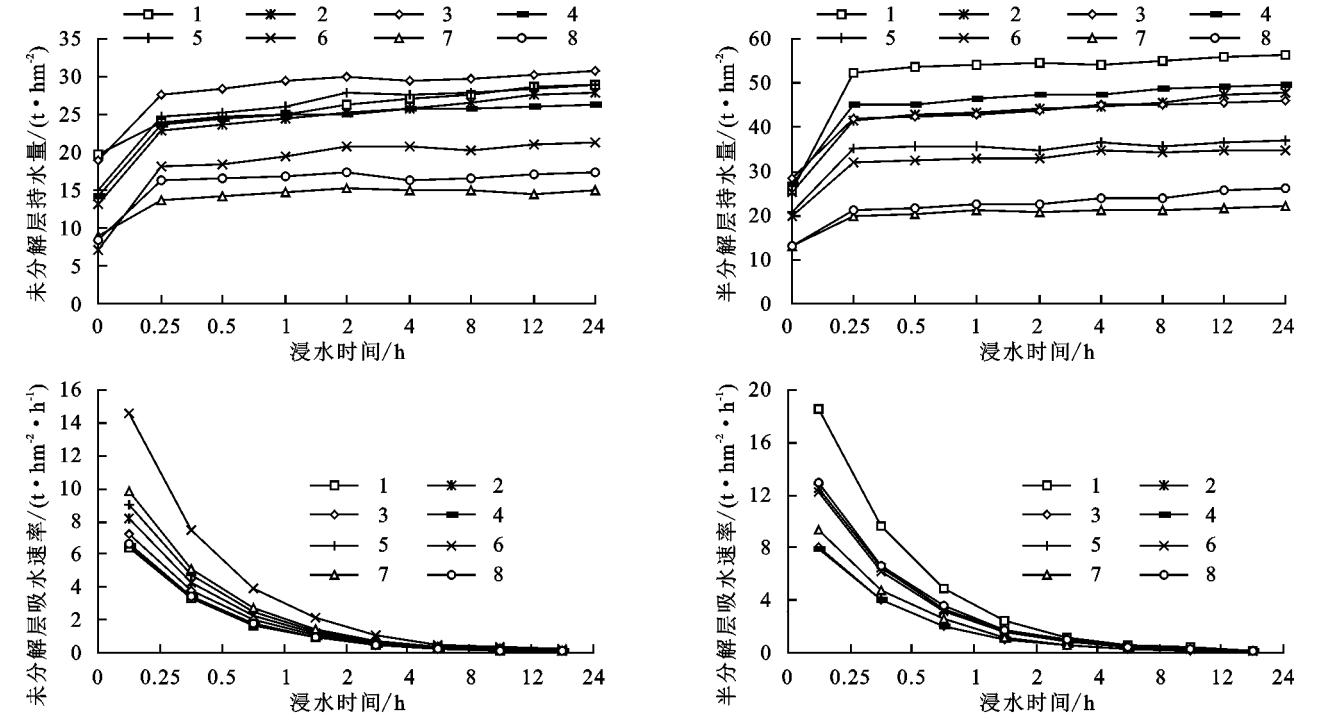


图 1 不同样地持水量、持水速率与浸水时间关系

3.3 枯落物拦蓄效应影响因素

影响森林枯落物持水拦蓄功能的因素很多,本文将地形指标(海拔和坡度)、林分结构指标(林龄、密度、郁闭度、胸径、树高)、林分抚育年限和林分更新状况与枯落物拦蓄功能指标进行 Pearson 相关性分

析。结果显示,枯落物未分解层蓄积量、半分解层蓄积量和总蓄积量之间呈极显著相关关系($P<0.01$),总最大持水量和总最大拦蓄量之间呈极显著相关关系($P<0.01$)。对上述多因素进行 RDA 分析,极显著相关因素保留一项,剔除共线性因素枯落物未分解

层蓄积量、半分解层蓄积量和总最大持水量 3 个因素。保留未分解层枯落物厚度、半分解层枯落物厚度、总蓄积量、半分解层最大持水量、未分解层最大持水量、半分解层最大拦蓄量、未分解层最大拦蓄量、总最大拦蓄量 8 个变量(图 2)。

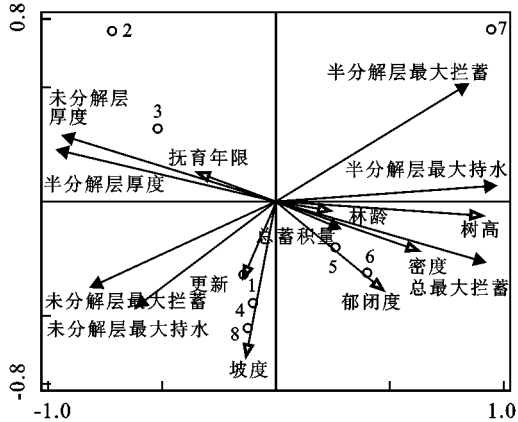


图 2 林分结构特征对枯落物拦蓄效应 RDA 排序

RDA 约束性分析总解释变量为 94.00%，调整解释变量 57.80% ($P<0.05$)，轴 1、轴 2、轴 3 和轴 4 修正的解释变量分别为 80.00%，89.83%，97.81% 和 99.72%，总体解释变量较高。由表 4 可以看出，通过简单效应和条件效应筛选，排除海拔和胸径 2 个因素，对比简单效应和条件效应各因素的解释度，树高解释度稳定，且最高 60.10%， $P<0.01$ ， $F=9.0$ 解释度较小的因素是林分更新，说明树高对枯落物的拦蓄效应因子起主导作用。

表 4 林分结构特征对枯落物拦蓄效应的前项选择和 Monte Carlo 检验

因素	简单效应			条件效应		
	解释度/%	F	P	解释度/%	F	P
树高	60.1	9.0	0.008	60.1	9.0	0.002
密度	28.4	2.4	0.086	0.7	0.1	0.878
郁闭度	17.3	1.3	0.274	3.1	0.5	0.457
抚育年限	12.6	0.9	0.396	7.2	2.2	0.204
林龄	9.3	0.6	0.538	9.3	1.6	0.232
坡度	7.0	0.4	0.646	7.0	1.1	0.390
更新	4.9	0.3	0.792	9.9	2.2	0.210

枯落物总最大拦蓄量、总蓄积量与各影响因素均体现正相关关系，各因素影响大小为树高>密度>郁闭度>坡度>林龄>更新>抚育年限；半分解层最大持水量、半分解最大拦蓄量与树高、林龄、密度和郁闭度之间呈正相关关系，与坡度、更新和抚育年限呈负相关关系；未分解层厚度、半分解层厚度、未分解层最大拦蓄量和未分解层最大持水量与抚育年限、更新和坡度体现出一定的正相关关系，抚育年限与枯落物厚度关系最为紧密，坡度与之关系较弱；未分解层最大拦蓄量正相关关系为坡度>更新>抚育年限，未分解层最大持水量正相关为坡度>更新>抚育年限，两者呈一致性。

4 讨论

4.1 枯落物的蓄积量

林分类型、林分结构、地形、气候、人为活动等因素均会影响枯落物的厚度和蓄积量^[18-20]。通过对 8 块不同密度华北落叶松纯林枯落物厚度和蓄积量的分析，各样地半分解枯落物厚度均大于未分解层，说明研究区林地枯落物分解速度良好，这与吴晓光等^[12]、胡晓聪等^[21]和 Qi 等^[22]的研究结果一致。从枯落物总蓄积量排序来看，蓄积量较小的 1,2,3 号样地也是林分密度最小的 3 块样地，密度差别不大，总蓄积量接近，样地未分解层和半分解层蓄积量之间也无显著差异 ($P<0.05$)，表明林分密度与枯落物蓄积量关系密切。枯落物的持水特性关系着枯落物拦蓄能力，其中最重要的指标是持水量和持水率。本研究中，8 块样地持水量基本与林分密度呈反比例，7 号样地 (62.07 t/hm²) 的持水量明显高于其他样地，持水量最小为 2 号样地；样地持水率最大为 1 号样地 (374%)，最小为 4 号样地 (213%)，可能是 1 号样地半分解层占比较高，吸水能力较强，4 号样地更新苗数量最多，枯落物组成中幼苗枝叶比例较大，枯落物自身吸水能力较差。枯落物有效拦蓄量是体现拦蓄能力最直接的指标，本研究中，枯落物有效拦蓄量排序为 7 号样地 (30.40 t/hm²)>6 号样地 (29.16 t/hm²)>5 号样地 (26.82 t/hm²)>8 号样地 (22.59 t/hm²)>1 号样地 (22.55 t/hm²)>4 号样地 (19.16 t/hm²)>3 号样地 (16.61 t/hm²)>2 号样地 (10.75 t/hm²)，其中 7,6 号样地有效拦蓄量接近，2 块样地林分结构差异不显著。2 号样地有效拦蓄量最小，对比其他 7 块样地，2 号样地林龄最小 (45 年)，平均树高最低，表明林龄对林地枯落物拦蓄量有直接影响，不同林龄导致枯落物组成成分有一定差异。

枯落物的持水量与浸水时间呈显著对数函数关系，吸水速率与浸水时间呈幂指数函数关系，这与现有大多研究^[23-24]结果一致。吸水速率反映枯落物吸水的速度，吸水速率越大，表明枯落物能够较快地拦截降水，尤其对雨强较大的降水，快速的吸水速率能够迅速吸收降雨和拦截径流，对森林充分发挥其水土保持和涵养水源功能具有重要作用。本研究的所有样地半分解层的吸水速率均高于未分解层，且半分解层分解度较高、易吸水，这与杨家慧等^[13]和杨霞等^[25]研究结果一致。同时，林分密度、郁闭度最小的 1 号样地的枯落物半分解层吸水速率最高，说明林地枯落物自然含水率低，也是枯落物高速率吸水的一个关键因素。

4.2 林分结构与枯落物

枯落物的水文效应与林分结构有密切关系。通过 RDA 分析得出，树高是影响枯落物拦蓄能力的主

要因素,林分密度、林龄、郁闭度与半分解层最大持水量、拦蓄量呈显著正相关($P<0.05$),与幼苗更新数量、抚育年限呈负相关($P<0.05$);未分解层持水量、拦蓄量与坡度、幼苗更新数量、抚育年限呈正相关($P<0.05$),海拔、胸径、冠幅与枯落物的拦蓄能力关系不明显。树高对枯落物的影响体现在 2 个方面:一是树高越高,冠层越厚,单位面积林分枝叶量越丰富,相应枯落物蓄积较大;二是树高直接影响到林地光照。树木越高,林地能够接受到的日照面积越大、时间更长,从而降低枯落物的自然含水量,提高枯落物最大拦蓄量和有效拦蓄量。林分平均胸径和冠幅与枯落物持水关系不大,可能由于林地密度较小,林分抚育后形成开阔的林窗,冠幅对林地遮挡面积较小,对枯落物水分和光照影响不大。

枯落物水文效应是一个多因素共同影响的复杂过程,受多种因素的影响。本研究中,树高和林分密度与枯落物水文功能关系较为密切,在后期经营中,可以尝试对林分密度调整的同时,适当进行人工修枝,以便提高第 1 枝下高高度,加强林地光照、空气、水分的循环,促进枯落物的分解,进而提高枯落物的拦蓄能力。本研究表明,枯落物厚度并不是阻碍华北落叶松自然更新的主要因素,抚育年限和林龄或许与华北落叶松的自然更新关系较为紧密,这部分需要今后深入研究。

5 结 论

(1)8 块不同密度华北落叶松样地枯落物厚度为 0.84~4.50 cm,半分解层的蓄积量均高于未分解层蓄积量,总蓄积量为 9.64~24.14 t/hm²,枯落物厚度与蓄积量呈正比关系,蓄积量最大为 5 号样地,最小为 3 号样地。

(2)样地最大持水量范围为 27.12~62.07 t/hm²,7 号样地持水量最大,2 号样地最小;持水率范围为 213%~374%,1 号样地持水率最大,4,5 号样地持水率较小。各样地有效拦蓄能力为 10.75~30.40 t/hm²,7 号样地拦蓄能力最佳,2 号样地最差,拦蓄能力与持水呈正相关。枯落物的持水量与浸水时间呈显著对数函数关系,吸水速率与浸水时间呈幂指数函数关系。

(3)林分结构对枯落物拦蓄量的影响为树高>密度>郁闭度>坡度>林龄>更新>抚育年限。其中,树高对枯落物的拦蓄量解释度最为突出(60.1%),林龄、苗木更新、抚育年限对枯落物拦蓄能力影响较小,海拔和林分平均胸径对枯落物拦蓄基本没有影响。

参考文献:

[1] 龚诗涵,肖洋,郑华,等.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.
[2] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服

务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.
[3] Park A, Friesen P, Serrud A A S. Comparative water fluxes through leaf litter of tropical plantation trees and the invasive grass *Saccharum spontaneum* in the Republic of Panama[J].Journal of Hydrology,2010,383(3):167-178.
[4] 曲杭峰,董希斌,张甜,等.大兴安岭白桦低质林补植改造后枯落物水文效应变化[J].东北林业大学学报,2017,45(8):14-19.
[5] 王安宁,蔺鑫,穆枫,等.冀北木兰围场沙荒坡地不同坡位黄柳沙障内枯落物的持水性能[J].北京林业大学学报,2018,40(1):98-107.
[6] Ferraz S F B, Lima W D P, Rodrigues C B. Managing forest plantation landscapes for water conservation[J].Forest Ecology and Management,2013,301:58-66.
[7] 刘斌,鲁绍伟,李少宁,等.北京西山 6 种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2015,29(4):73-78,137.
[8] 王美莲,王飞,姚晓娟,等.不同林龄兴安落叶松枯落物及土壤水文效应研究[J].生态环境学报,2015,24(6):925-931.
[9] 魏强,凌雷,张广忠,等.甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及持水特性[J].应用生态学报,2011,22(10):2589-2598.
[10] 刘京晶,马岚,薛孟君,等.不同处理下油松枯落物减流减沙效应试验研究[J].水土保持学报,2019,33(4):126-132.
[11] 郝弯弯,赵鹏,李思维,等.御道口牧场不同类型防护林的枯落物水文效应[J].水土保持学报,2019,33(6):197-204.
[12] 吴晓光,刘龙,张宏飞,等.砒砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及土壤物理性质[J].水土保持学报,2020,34(4):137-144.
[13] 杨家慧,谭伟,卯光宪,等.黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价[J].水土保持学报,2020,34(2):296-301,308.
[14] 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.
[15] 袁秀锦,肖文发,潘磊,等.马尾松林分结构对枯落物层和土壤层水文效应的影响[J].林业科学研究,2020,33(4):26-34.
[16] 赵总,刘勇,田祖为,等.红锥种子雨土壤种子库与幼苗更新动态[J].林业科学,2020,56(5):37-49.
[17] 李朝婵,钱沉鱼,全文选,等.迷人杜鹃群落天然更新障碍的化感研究[J].中南林业科技大学学报,2018,38(9):9-13.
[18] 朱方方,程金花,郑雪慧,等.马尾松林地不同枯落物覆盖下土壤入渗特征[J].水土保持学报,2020,34(4):85-90,97.