

宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林 枯落物水文效应

高迪^{1,2}, 郭建斌^{1*}, 王彦辉², 王晓², 马菁^{1,2}, 洪流^{1,2}, 高艳斌³

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091;
3. 山西农业大学林学院, 山西 太谷 030801)

摘要: [目的] 探究林龄对华北落叶松林枯落物水文效应的影响。[方法] 于2017年6月在宁夏六盘山香水河小流域选择4种林龄阶段(16、25、34、43a)的华北落叶松人工林样地, 调查林分结构和测量林下枯落物蓄积量、厚度、持水量等指标, 分析不同林龄华北落叶松枯落物层持水能力差异。[结果] 研究表明: (1) 华北落叶松枯落物厚度介于4.5~6.0 cm, 总蓄积量在29.08~33.21 t·hm⁻², 且半分解层蓄积量高于未分解层蓄积量, 4种林龄枯落物厚度与蓄积量均表现为成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林。(2) 各龄林枯落物最大持水量介于79.47~110.05 t·hm⁻², 成熟林最大; 最大持水率变动在273.32%~341.27%, 中龄林最大。(3) 各龄林枯落物持水量、吸水速率与浸水时间动态变化均类似, 枯落物持水过程表现为浸水0.5 h内吸水速率最大, 4 h之后吸水速率趋于平缓, 10 h后枯落物持水量基本饱和, 持水量与浸水时间均呈明显对数关系($R^2 > 0.92$)。(4) 各龄林枯落物有效拦蓄量在43.64~70.52 t·hm⁻²之间, 成熟林拦蓄能力最强。[结论] 综合分析4种林龄枯落物水文效应, 成熟林枯落物层水文功能最强。

关键词: 六盘山; 华北落叶松; 林龄; 枯落物; 水文功能

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)04-0026-07

华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 是我国北方广大地区的主要造林树种之一, 其人工林的水土保持和水源涵养等生态水文功能对于维持区域生态平衡发挥重要的作用^[1-3]。地处我国西北地区黄土高原的宁夏六盘山为泾河、葫芦河、清水河等河流发源地, 也是我国黄土高原的重要水源地, 该地区生态环境脆弱, 植被破坏严重, 森林植被的生态水文功能亟待恢复和加强。然而目前存在树种单一、间伐不及时、密度不合理等问题, 导致生物多样性降低、水源涵养功能衰退等一系列问题^[4]。研究表明森林枯落物层的水文效应受到林分组成、林龄、密度、立地条件等特征的影响。对宁夏六盘山地华北落叶松林下枯落物水文效应的林分密度与坡向差异的研究表明^[5-6], 林分密度为1 600 株·hm⁻²以及

在中坡坡位时, 华北落叶松枯落物层持水能力最优, 但缺少对不同林龄华北落叶松枯落物层持水能力差异分析。本研究通过分析宁夏六盘山地不同林龄的华北落叶松人工林枯落物层的储量、持水量、蓄水能力等年际差异关系, 量化华北落叶松林枯落物层结构特征及其水文功能的动态变化。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于六盘山南部香水河小流域(106°10'~106°30' E, 35°15'~35°42' N), 该地海拔高2 040~2 942 m, 流域面积约43.74 km², 属暖温带半湿润气候, 年均气温5.8℃, 年均相对湿度68%, 无霜期90~130 d, 多年平均降水量632 mm, 6—9

收稿日期: 2018-09-20 修回日期: 2018-12-28

基金项目: 宁夏回族自治区农业科技自主创新专项全产业链创新示范项目(QCYL-2018-12)、国家重点研发计划项目(2016YFC0501603、2017YFC0504602)、国家自然科学基金项目(41671025、41230852)、国家林业和草原局宁夏六盘山森林生态站资助。

* 通讯作者: 郭建斌, E-mail: jianbinguo@bjfu.edu.cn

月占全年降水量的 72.2%, 全年蒸发量 1 214 ~ 1 426 mm。土壤类型主要为灰褐土。

香水河小流域的森林植被生长良好, 森林覆盖率达 73%, 主要为天然次生林、人工林及灌丛, 人工林以华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 为主, 面积占 23.62%。另有一些油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.)、青海云杉 (*Picea crassifolia* Kom.)、白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 等人工林; 天然次生林的树种组成包括辽东栎 (*Quercus liaotungensis* Koidz.)、少脉槲 (*Tilia paucicostata* Maxim.)、红桦 (*Betula albo-sinensis* Burk.)、山杨 (*Populus davidiana* Dode) 和 华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 等; 林下灌丛主要由华西箭竹 (*Fargesia nitida* (Mitford) Keng f.)、李 (*Prunus salicina* Lindl.)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.)、灰栒子 (*Cotoneaster acutifolius*

Turcz.)、峨眉蔷薇 (*Rosa omeiensis* Rolfe) 等组成; 林下草本植物主要有苔草 (*Carex* spp.)、东方草莓 (*Fragaria orientalis* Losinsk) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置和调查 2017年6月, 在香水河小流域内, 选取不同林龄华北落叶松人工林样地, 按其林龄分为幼龄林(平均林龄 16 a)、中龄林(平均林龄 25 a)、近熟林(平均林龄 34 a)、成熟林(平均林龄 43 a), 各林龄选取 2 块立地条件基本一致样地, 单个样地面积为 20 m × 20 m, 调查样地内所有树木树高、胸径、枝下高等林分结构指标, 记录海拔、坡度、坡向等地形指标, 各样地林冠层叶面积指数(LAI)则采用 LAI-2200 冠层分析仪测定, 每个样地随机选取 9 个点, 计算其平均值作为样地的叶面积指数^[5]。各林分样地基本情况见表 1。

表 1 不同林龄华北落叶松林分标准地概况

Table 1 Basic features of plots of *Larix principis-rupprechtii* plantation with different age

龄组 Age group	海拔 Altitude /m	坡向 Aspect	坡度 Slope /(°)	平均树高 Average tree height/m	平均胸径 Average DBH/cm	平均冠幅 Average crown/m	叶面积指数 Leaf area index	枝下高 Under branch height/m	林分密度 Stand density /(tree · hm ⁻²)	郁闭度 Canopy density	
幼龄林 Young forest	样地 1	2 207	E	15	10.34	8.39	1.35	2.23	3.36	1 325	0.77
	样地 2	2 214	E	12	11.05	9.45	1.51	2.51	4.02	1 400	0.66
中龄林 Middle-aged forest	样地 3	2 148	E	15	12.40	16.82	2.76	2.73	1.4	1 300	0.75
	样地 4	2 322	E	22	14.63	13.36	1.66	2.62	5.57	1 450	0.77
近熟林 Near-mature forest	样地 5	2 250	NE	12	12.22	11.12	1.55	3.06	4.33	1 200	0.65
	样地 6	2 143	NE	13	17.85	16.30	1.75	3.46	6.87	1 125	0.72
成熟林 Mature forest	样地 7	2 149	NE	13	22.59	31.44	3.35	5.38	4.19	1 200	0.72
	样地 8	2 109	NE	9	18.87	25.39	2.89	4.70	5.69	1 150	0.65

1.2.2 枯落物采集与蓄积量测定 在不同林龄样地内四角及中心, 划出 30 cm × 30 cm 枯落物样方, 调查枯落物层的厚度和蓄积量。将枯落物分为未分解层(O_L)和半分解层(O_F), 用钢尺测定厚度, 然后分别取样后装入密封塑料袋, 带回室内进行持水特性测定。在室内, 对取回的枯落物样品分层称取鲜质量, 其后在烘箱中 65℃ 条件下烘干至恒质量, 计算枯落物层自然含水率及蓄积量。

1.2.3 枯落物持水能力测定 采用室内浸泡法测定, 在尽量保持枯落物原状的前提下, 将烘干后枯落物未分解层和半分解层样品放入筛中, 置于盛有清水的容器中, 分别在累计浸水时间 0.25、0.5、1、2、4、8、10、24 h 取出样品, 放置到不再滴水时称质量, 每组枯落物 3 次重复, 测定枯落物持水动态过程, 计算枯落物持水量、相应最大持水量、最大持水率等

指标。

1.2.4 枯落物有效拦蓄量测定 枯落物对降雨的实际拦蓄量可用枯落物有效拦蓄量来表示, 当降雨量达到 20 ~ 30 mm 以后, 枯落物层实际持水率为最大持水率的 85% 左右, 取调整系数 0.85 来估算枯落物层的有效拦蓄量^[7]。

$$W = (0.85R_m - R_o)M \quad (1)$$

式中: W 为枯落物有效拦蓄量; R_o 为枯落物平均自然含水率; M 为枯落物蓄积量; R_m 为最大持水率; 0.85 为有效拦蓄系数。

1.2.5 数据处理 用 Microsoft Excel 2010 软件处理数据, 并用 SigmaPlot 绘图; 运用 R 软件对枯落物蓄积量及厚度进行单因子方差分析(one-way ANOVA), 显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 枯落物蓄积量的林龄差异

如表2所示,不同林龄样地的枯落物总厚度变化在4.5~6.0 cm,其中未分解层1.0~2.8 cm、半分解层3~5 cm,表现为成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林,呈随林龄加大而增大的趋势,单因素方差分析表明林龄之间的枯落物厚度差异显著($P < 0.05$);不同林龄样地的枯落物总蓄积量介于29.08~33.21 $t \cdot \text{hm}^{-2}$,其中未分解层和半分解层分别为

表2 不同林龄华北落叶松人工林枯落物厚度与蓄积量

Table 2 Thickness and storage of the litter of *Larix principis-rupprechtii* plantations with different age

龄组 Age group	枯落物层厚度 Thickness/cm			枯落物蓄积量 Biomass storage/($t \cdot \text{hm}^{-2}$)				
	未分解层 Un-decomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	总计 Total	未分解层 Un-decomposed layer	比例 Percent /%	半分解层 Semi-decomposed layer	比例 Percent /%	总计 Total
幼龄林 Young forest	1.5	3.0	4.5	9.47	32.58	19.6	67.42	29.08
中龄林 Middle-aged forest	2.1	3.5	5.6	9.73	31.75	20.92	68.25	30.65
近熟林 Near-mature forest	2.8	3.0	5.8	14.89	45.16	18.08	54.84	32.97
成熟林 Mature forest	1.0	5.0	6.0	8.50	25.59	24.71	74.41	33.21

2.2 枯落物持水特性

2.2.1 不同林龄样地枯落物的累计持水量差异 4种林龄的未分解层和半分解层枯落物的累积持水动态变化过程差异见图1。各林龄样地枯落物的未分解层和半分解层的累积持水量在最初浸泡1 h之内,迅速增加,之后随浸泡时间延长,增加速度逐步

趋缓,在浸泡10 h后,基本稳定,继续增加的幅度很小,在24 h就基本达到最大持水量。未分解层枯落物累积持水量变化的林龄差异均表现为成熟林>中龄林>近熟林>幼龄林,半分解层枯落物则表现为中龄林>成熟林>近熟林>幼龄林。

趋缓,在浸泡10 h后,基本稳定,继续增加的幅度很小,在24 h就基本达到最大持水量。未分解层枯落物累积持水量变化的林龄差异均表现为成熟林>中龄林>近熟林>幼龄林,半分解层枯落物则表现为中龄林>成熟林>近熟林>幼龄林。

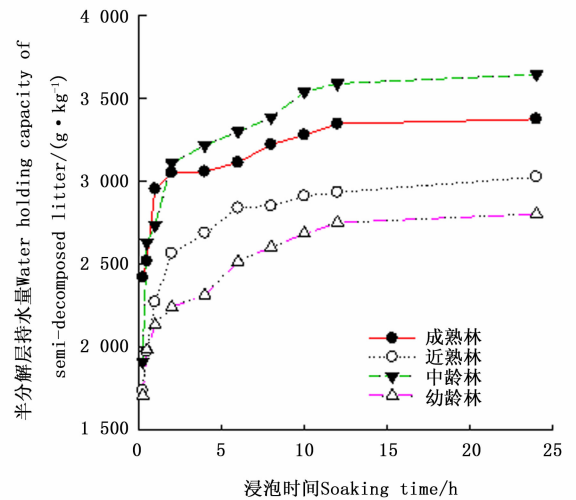
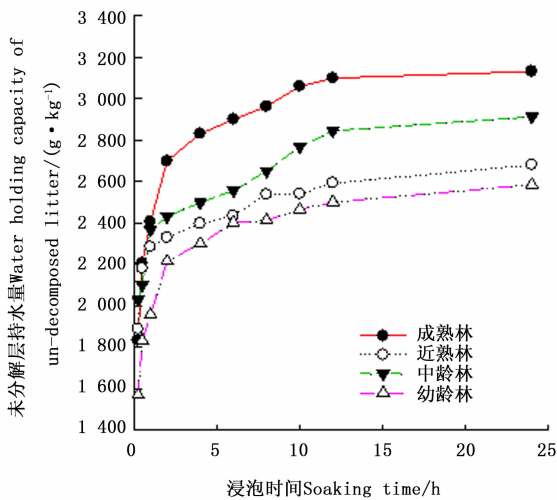


图1 不同林龄林下枯落物未分解层和半分解层枯落物的累计持水量随浸泡时间的变化

Fig. 1 Variation of water-holding capacity of un-decomposed and semi-decomposed litter from the plots with different ages

对不同林龄华北落叶松林样地未分解层、半分解层枯落物累积持水量与浸泡时间进行回归分析,

得出两者符合对数函数模型:

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

式中: Q 为枯落物累积持水量($g \cdot kg$); t 为浸泡时间(h); a 和 b 为拟合的方程参数。

表3中各回归方程相关系数 $R^2 > 0.92$,模型拟合效果较好。

2.2.2 不同林龄样地枯落物瞬时吸水速率的差异

枯落物瞬时吸水速率随浸水时间的变化规律及林龄差异见表4。4种林龄样地的未分解层和半分解

层枯落物的瞬时吸水速率均在0.5 h内迅速下降,之后逐渐缓慢下降,在浸泡4 h后显著减缓并进入平缓减小变化阶段。在不同林龄样地之间,成熟林的未分解层瞬时吸水速率变化过程总是高于其他林龄;而对半分解层则为中龄林的瞬时吸水速率相对最大。

表3 不同林龄林下枯落物累积持水量与浸水时间关系

Table 3 Correlations between water-holding capacity of litter and soaking time in different ages

龄组 Age group	未分解层 Un-decomposed layer		半分解层 Semi-decomposed layer	
	关系式 Relation	R^2	关系式 Relation	R^2
幼龄林 Young forest	$y = 219.96 \ln(t) + 1\,964.05$	0.97	$y = 239.78 \ln(t) + 2\,091.14$	0.98
中龄林 Middle-aged forest	$y = 195.41 \ln(t) + 2\,284.83$	0.97	$y = 350.65 \ln(t) + 2\,692.17$	0.93
近熟林 Near-mature forest	$y = 151.05 \ln(t) + 2\,208.08$	0.94	$y = 292.33 \ln(t) + 2\,235.46$	0.97
成熟林 Mature forest	$y = 284.70 \ln(t) + 2\,375.55$	0.96	$y = 211.89 \ln(t) + 2\,784.01$	0.92

表4 不同林龄的未分解层和半分解层枯落物瞬时吸水速率随浸泡时间的变化

Table 4 Variation of water absorption of un-decomposed and semi-decomposed litter from the plots with different ages

龄组 Age group	层次 Humus layer	浸泡时间 Soaking time/h									
		0.25h	0.5h	1h	2h	4h	6h	8h	10h	12h	24h
幼龄林 Young forest	未分解 O_L	6 279.94	3 664.94	1 958.58	1 107.75	575.17	400.35	301.63	246.56	208.40	107.72
	半分解 O_F	6 835.73	3 966.77	2 134.69	1 121.14	578.87	419.46	325.57	268.56	229.43	116.86
中龄林 Middle-aged forest	未分解 O_L	8 119.73	4 201.55	2 366.92	1 215.88	624.69	426.13	331.32	276.79	237.10	121.37
	半分解 O_F	7 648.96	5 262.62	2 736.12	1 555.24	804.46	550.18	423.34	354.02	299.25	151.88
近熟林 Near-mature forest	未分解 O_L	7 553.49	4 363.41	2 285.08	1 164.82	599.49	405.72	317.24	253.95	216.05	111.69
	半分解 O_F	6 961.22	3 947.05	2 273.72	1 283.50	672.52	473.57	356.65	291.23	244.60	126.17
成熟林 Mature forest	未分解 O_L	7 332.38	4 412.57	2 405.93	1 349.17	695.33	468.13	357.80	295.92	251.57	130.47
	半分解 O_F	9 684.27	5 036.53	2 955.67	1 525.50	765.04	519.07	402.88	328.04	279.02	140.66

2.2.3 不同林龄枯落物层的持水能力 枯落物的最大持水量和最大持水率表示枯落物的持水能力^[8],表5所示,4种林龄样地未分解层枯落物最大持水量变化范围为24.49~39.91 $t \cdot hm^{-2}$,近熟林的最大;半分解层的最大持水量在54.74~83.42 $t \cdot hm^{-2}$ 。各林龄样地未分解层和半分解层的总的最大持水量变化在79.47~110.05 $t \cdot hm^{-2}$,成熟林的最大(110.05 $t \cdot hm^{-2}$,相当于11 mm水深),幼龄林的最小(79.47 $t \cdot hm^{-2}$,相当于7.9 mm水深),排序为成熟林>中龄林>近熟林>幼龄林。4种林

龄枯落物层最大持水量均表现为半分解层大于未分解层。

通过比较发现,枯落物最大持水率与最大持水量变化规律并不一致,未分解层最大持水率变化在258.53%~313.12%,林龄排序为成熟林>中龄林>近熟林>幼龄林;半分解层最大持水率变化范围为280.47%~364.52%,林龄排序为中龄林>成熟林>近熟林>幼龄林;所有枯落物的平均最大持水率变化范围为273.32%~341.27%,林龄排序为中龄林>成熟林>近熟林>幼龄林。

表5 枯落物最大持水率和最大持水量

Table 5 The maximum water holding ratio and capacity of humus layers

龄组 Age group	最大持水率 Maximum water-holding rate/%			最大持水量 Maximum water-holding capacity/($t \cdot hm^{-2}$)		
	未分解层 Un-decomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	平均 Average	未分解层 Un-decomposed layer	半分解层 Semi-decomposed layer	总计 Total
幼龄林 Young forest	258.53	280.47	273.32	24.49	54.98	79.47
中龄林 Middle-aged forest	291.28	364.52	341.27	28.34	76.24	104.58
近熟林 Near-mature forest	268.06	302.80	287.11	39.91	54.74	94.65
成熟林 Mature forest	313.12	337.60	331.33	26.63	83.42	110.05

2.3 不同林龄样地枯落物层的拦蓄能力

由表6看出,不同林龄样地的未分解层有效拦蓄量变化范围为13.66~27.84 t·hm⁻²,林龄排序为近熟林>中龄林>成熟林>幼龄林,半分解层有效拦蓄量变化范围为29.99~54.36,林龄排序为成

熟林>中龄林>近熟林>幼龄林,各林龄华北落叶松枯落物总拦蓄能力变化范围为43.64~70.52 t·hm⁻²,林龄排序依次为成熟林>中龄林>近熟林>幼龄林。

表6 不同林龄林分枯落物层有效拦蓄量

Table 6 Modified interception amount of the litter with different ages of forests

龄组 Age group	层次 Humus layer	蓄积量 Humus storage/ (t·hm ⁻²)	自然含水率 Nature moisture content/%	最大持水量 Maximum water-holding capacity/(t·hm ⁻¹)	最大持水率 Maximum water-holding rate/%	最大拦蓄率 Maximum interception rate/%	有效拦蓄量 Modified interception amount/(t·hm ⁻²)
幼龄林 Young forest	未分解 O _L	9.47	75.57	22.49	258.53	182.95	13.66
	半分解 O _F	19.60	85.45	54.98	280.47	195.02	29.99
	总计 Total	29.08	82.23	79.48	273.32	191.09	43.64
中龄林 Middle-aged forest	未分解 O _L	9.73	77.70	28.34	291.28	213.58	16.53
	半分解 O _F	20.92	70.82	76.24	364.52	293.70	49.99
	总计 Total	30.64	73.01	104.58	341.27	268.27	66.52
近熟林 Near-mature forest	未分解 O _L	14.89	40.86	39.91	268.06	227.21	27.84
	半分解 O _F	18.08	63.74	54.74	302.80	239.06	35.01
	总计 Total	32.97	53.41	94.66	287.11	233.71	62.85
成熟林 Mature forest	未分解 O _L	8.50	76.13	26.63	313.12	236.99	16.16
	半分解 O _F	24.71	66.96	83.42	337.60	270.63	54.36
	总计 Total	33.21	69.31	110.05	331.33	262.02	70.52

3 讨论

3.1 枯落物蓄积量

许多研究表明,森林枯落物蓄积量受林分密度、林木大小、林分生物量等因素及其决定的枯落物输入量、局部水热条件、枯落物分解难易程度、积累年限等共同决定的分解速度的综合影响^[9-11]。本研究中,凋落物现存量与林龄基本呈正相关关系,即随着林龄增大,凋落物现存量增多^[12]。不同林龄华北落叶松林的枯落物总厚度和总蓄积量大小依次为:成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林,与王美玲^[12]等人的研究结果一致(成熟林>近熟林>中龄林),各林龄华北落叶松林的半分解层枯落物储量均高于未分解层储量,与周志立等^[8]、韩路等^[14]的研究结果一致。这是因为林地凋落物层是由凋落物逐渐积累形成,并处于不断分解和积聚的动态变化过程^[15]。一方面,相比较幼龄林,大龄林其平均冠幅最大,叶面积指数也最大,决定了每年大龄林相比幼龄林有更多的凋落物输入,此外,林龄的增长也意味着枯落物层有较长年限的堆积过程,这些因素共同决定了枯落物的蓄积量随林龄的增大是一个逐渐增大过程;从枯落物的分解角度看,较大林龄的枯落物层枯落物堆积相对紧密、孔隙较小、密度较大^[16];另一方

面,随着林龄的增大,华北落叶松人工林郁闭度呈现增大的趋势^[17],造成林内穿透雨、气温和光照随林龄增大呈现降低的趋势,这些因素决定了华北落叶松纯林枯落物的物理淋溶和破碎过程随林龄增大表现为减少的趋势^[18],另外,枯落物层的生物化学分解过程主要依赖土壤微生物^[19-20],由于华北落叶松纯林结构单一,其林下草本、微生物组成也呈现随林龄的增大降低的趋势^[21],这就造成微生物的分解能力与林龄呈负相关。由于林分结构、环境条件和微生物因子的共同作用,导致华北落叶松纯林随林龄的增加具有更多的枯落物积累及较小的分解速率,从而形成较多的分解层。

3.2 枯落物持水性能

本研究中,不同林龄样地枯落物最大持水量和最大持水率均以成熟林最大,其中,未分解层枯落物最大持水量均值低于半分解层枯落物的,与李良^[22]、胡淑萍^[23]等人对华北落叶松枯落物半分解层最大持水量大于未分解层的研究结果一致,说明半分解层持水性能在枯落物水源涵养中起主要作用,但与齐记^[24]等人对油松枯落物最大持水量的研究结果相反。这是因枯落物持水能力受到多种因素影响,包括枯落物的蓄积量、干燥程度、内部结构或排列形状等,华北落叶松林枯落物的半分解层比未

分解层的孔隙度较小,相对密度更大,因而更易持水。

3.3 枯落物吸持水分性能

不同林龄样地的枯落物吸水速率变化过程具有规律性,枯落物的累计持水量与浸水时间呈正相关。在浸泡过程的前2 h 枯落物累积持水量呈快速上升,在浸泡10 h 后,其累积持水量呈平缓上升,并逐渐趋于最大值后保持稳定。枯落物未分解层和半分解层的瞬时吸水速率变化过程基本一致,均在最初的0.5 h 内变化最快,之后在4 h 后逐渐减缓,在8 h 后显著减缓,这与赵阳^[25]等人对落叶松枯落物持水能力研究结果一致。这是因为枯落物在浸水初期,自身相对干燥,与自由水的水势差较大,从而瞬时吸水速率量大;随着浸水时间延长,枯落物吸入水量增多并逐渐浸入其内部,逐渐接近枯落物的最大持水量,其瞬时吸水速率必然快速减缓^[26]。

3.4 枯落物层拦蓄能力

本研究中,随着林龄增长,林分枯落物的有效拦蓄量基本呈上升趋势,其中以成熟林的拦蓄量最大,这与前人^[21]的研究结果一致。研究结果表明华北落叶松成熟林枯落物层具有更好的持水能力,对森林涵养水源、保持水土具有重要的意义,在流域水资源管理中应确定合理的森林年限,保持枯落物最佳的水文效应,并综合考虑森林多种生态服务功能,为宁夏六盘山森林的抚育更新及流域水资源管理提供参考。

4 结论

对宁夏六盘山区香水河小流域华北落叶松人工林的枯落物层蓄积量及持水性能研究表明:

(1)不同林龄样地的华北落叶松枯落物层蓄积量变化在29.08 ~ 33.21 t · hm⁻²,其中成熟林蓄积量最大,然后依次为近熟林、中龄林、幼龄林。

(2)不同林龄样地的枯落物层最大持水量变动在79.47 ~ 110.05 t · hm⁻²,其中成熟林最大,然后依次为中龄林、近熟林、幼龄林,最大持水率变化范围在273.32% ~ 341.27%,其中中龄林最大,然后依次为成熟林、近熟林、幼龄林。

(3)不同林龄样地的枯落物在浸泡过程中,都表现出枯落物的瞬时吸水能力在最初2 h 内保持较高但快速降低;以后随浸水时间延长,枯落物瞬时蓄水能力不断缓慢降低,并最终趋于平缓,在10 h 左右达到饱和。枯落物累积持水量与浸水时间符合对

数函数关系。

(4)不同林龄样地的枯落物有效拦蓄量变化在43.64 ~ 70.52 t · hm⁻²,以成熟林的有效拦蓄量最高,然后依次为中龄林、近熟林、幼龄林。

参考文献:

- [1] 何常清,于澎涛,管伟,等. 华北落叶松枯落物覆盖对地表径流的拦阻效应[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5):595-599.
- [2] 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.
- [3] Garcia-Palacios P, Mckie B G, Handa I T, et al. The importance of litter traits and decomposers for litter decomposition: a comparison of aquatic and terrestrial ecosystems within and across biomes [J]. *Functional Ecology*, 2016, 30(5):819-829.
- [4] 王晶,莫菲,段文标,等. 六盘山南坡不同密度华北落叶松水源林生长过程比较[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3):500-506.
- [5] 刘宇,郭建斌,王彦辉,等. 宁夏六盘山不同密度华北落叶松人工林枯落物水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 36-44.
- [6] 王正安. 六盘山叠叠沟小流域不同坡位华北落叶松人工林生态水文功能研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [7] 时忠杰,王彦辉,徐宏宏,等. 六盘山主要森林类型枯落物的水文功能[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(1):91-99.
- [8] 周志立,张丽玮,陈倩,等. 木兰围场3种典型林分枯落物及土壤持水能力[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1):207-213.
- [9] 樊登星,余新晓,岳永杰,等. 北京西山不同林分枯落物层持水特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2008,30(S2):177-181.
- [10] 魏强,凌雷,王多锋,等. 甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及其影响因子[J]. 林业科学研究, 2015, 28(6):818-825.
- [11] 施妍,陈芳清. 大老岭自然保护区日本落叶松林凋落物分解及养分释放研究[J]. 林业科学研究, 2016,29(3):430-435.
- [12] 郑路,卢立华. 我国森林地表凋落物现存量及养分特征[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(1):63-69.
- [13] 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.
- [14] 韩路,王海珍,吕瑞恒,等. 塔里木河上游不同森林类型枯落物的持水特性[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):96-101.
- [15] 郭婧,喻林华,方晰,等. 中亚热带4种森林凋落物量、组成、动态及其周转期[J]. 生态学报, 2015, 35(14):4668-4677.
- [16] 张学龙,金铭,刘贤德,等. 祁连山5种典型灌木林枯落物蓄积量及其持水特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5):735-740.
- [17] 杨会侠,汪思龙,范冰,等. 不同林龄马尾松人工林年凋落物量与养分归还动态[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12):2334-2340.

- [18] 唐 禾, 陈永华, 张建国, 等. 抚育间伐对麻栎次生林枯落物持水性的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 104 - 109 + 115.
- [19] 李学斌, 陈 林, 吴秀玲, 等. 荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4105 - 4114.
- [20] 任立宁, 刘世荣, 王 一, 等. 毛竹和林下植被芒箕凋落物分解特征研究[J]. 林业科学研究, 2018, 31(5): 91 - 97.
- [21] 贺同鑫, 李艳鹏, 张方月, 等. 林下植被剔除对杉木林土壤呼吸和微生物群落结构的影响[J]. 植物生态学报, 2015, 39(8): 797 - 806.
- [22] 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(3): 32 - 34.
- [23] 胡淑萍, 余新晓, 岳永杰. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 146 - 150.
- [24] 齐 记, 史 宇, 余新晓, 等. 北京山区主要树种枯落物水文功能特征研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 73 - 77.
- [25] 赵 阳, 余新晓, 吴海龙, 等. 华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 148 - 152.
- [26] 徐 娟. 北京山区典型森林枯落物层生态功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.

Hydrological Effects of Forest Litters of *Larix principis-rupprechtii* Plantations with Varying Ages in Liupanshan of Ningxia, China

GAO Di^{1,2}, GUO Jian-bin¹, WANG Yan-hui², WANG Xiao², MA Jing^{1,2}, HONG Liu^{1,2}, GAO Yan-bin³

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

2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China)

Abstract: [Objective] To study the impacts of forest age on hydrological functions of humus. [Method] Four *Larix principis-rupprechtii* plantations (mature, near mature, middle age and young) at Xiangshuihe Watershed in Liupanshan were selected in June 2017. The hydrological functions of litter of these *L. principis-rupprechtii* plantations were surveyed by investigating the stand structure and measuring the amount, thickness and water holding capacity of litter accumulation. [Result] (1) The thickness of litter ranged from 4.5 to 6.0 cm, the total accumulation was 29.08 ~ 33.21 t · hm⁻², and the storage of semi-decomposed layer were higher than that of the undecomposed layer. The thickness and accumulation of litter in these plantations were found in the order of mature forest > near mature forest > middle age forest > young forest. (2) The litter of mature forest had the maximum water holding capacity which was between 79.47 and 110.05 t · hm⁻². The middle aged forest had the highest change rate of water holding capacity, which varied from 273.32% to 341.27%. (3) Dynamic relationship between water holding capacity and soaking time of litter of all these plantations was similar. The water absorption rate of the litter was the highest within 0.5 hour, and the variation of water absorption rate tended to be gentle after 4 hours. The water content of the litter was basically saturated after 10 hours, the relationship between water holding capacity and soaking time followed a significant logarithmic relationship ($R^2 > 0.92$). (4) The valid water-interception capacity of litter was between 43.64 and 70.52 t · hm⁻², the mature forest had the strongest intercepting capacity. [Conclusion] The hydrological function of litter reaches their maximums in mature forest. The results of this study can be used as a reference for the research on hydrological process of the litter layer of *L. principis-rupprechtii* plantation.

Key words: Liupanshan; *Larix principis-rupprechtii*; forest age; forest litter; hydrological function

(责任编辑: 彭南轩)