

黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价

杨家慧¹, 谭伟^{1,2}, 卯光宪¹, 冯艳³

(1.贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2.贵州大学林业信息工程研究中心,
贵阳 550025; 3.安顺市平坝区林业局, 贵州 安顺 561100)

摘要: 为了解不同林龄柳杉人工林枯落物的水源涵养能力, 为森林水土保持措施的确定和实施提供依据, 于2018年10月选取平坝区大坡林场5个龄组柳杉人工林作为研究对象, 采用烘干法和实验室浸水法对枯落物的持水性能进行研究, 并采用熵权法对柳杉人工林5个龄组枯落物水源涵养能力进行综合评价。结果表明: (1) 随着柳杉人工林的生长发育, 枯落物储量及持水特性呈现先增加后减小的趋势, 表现出成熟林最大, 幼龄林最小。其中成熟林枯落物厚度为7.40 cm, 蓄积量为2.21 t/hm², 最大持水量为6.46 t/hm², 最大持水率为265.14 t/hm², 有效拦蓄量为3.94 t/hm², 有效拦蓄率为175.74%。(2) 利用熵权法计算出柳杉人工林5个龄组枯落物的水源涵养能力为成熟林(11.46) > 近熟林(10.79) > 过熟林(8.26) > 中龄林(4.83) > 幼龄林(3.94), 柳杉成熟林具有最佳的水源涵养能力。

关键词: 黔中; 柳杉人工林; 林龄; 水源涵养

中图分类号: S727.21

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0296-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.02.042

Water Conservation Ability of Litter in *Cryptomeria fortunei* Plantation with Different Age Groups in Central Guizhou

YANG Jiahui¹, TAN Wei^{1,2}, MAO Guangxian¹, FENG Yan³

(1.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; 2.Research Center of Forestry Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025; 3.Forestry Bureau, Pingba District, Anshun City, Anshun, Guizhou 561100)

Abstract: The purposes of this study were to understand the water conservation capacity of litter of *Cryptomeria fortunei* plantation with different forest ages, and to provide basis for the determination and implementation of forest soil and water conservation measures. Five age groups of *C. fortunei* plantation in Pingba Dapo Forest Farm of Guizhou Province were chosen as object in October 2018. The water holding capacity of litter was studied by drying method and laboratory immersion method, and the water conservation function of litter in five age groups was evaluated comprehensively by entropy weight method. The results showed that: (1) With the growth and development of *C. fortunei* plantation, litter reserves and water holding characteristics showed a trend of first increasing and then decreasing, showing that mature forest was the largest and young forest was the smallest. The litter thickness, volume, maximum water-holding capacity, maximum water-holding rate, effective storage capacity and effective storage rate of mature forest were 7.40 cm, 2.21 t/hm², 6.46 t/hm², 265.14 t/hm², 3.94 t/hm², and 175.74% respectively. (2) The water conservation capacity of litter in five age groups was calculated by the method of entropy weight, which was: mature forest (11.46) > near-mature forest (10.79) > over-mature forest (8.26) > middle-aged forest (4.83) > young forest (3.94). The mature forest had the largest water conservation capacity.

Keywords: central Guizhou; *Cryptomeria fortunei* plantation; forest age; water conservation

水源涵养功能是森林生态系统服务功能的重要体现, 森林生态系统通过林冠、枯落物和土层的连续作用, 完成降雨分配和水源涵养的过程^[1]。其中, 地

表枯落物层对林地水源涵养和改善土壤结构有重要作用^[2]。目前, 国内外对森林水源涵养的功能评价、多树种间的水源涵养能力、土壤水文特征等^[3-8]进行

收稿日期: 2019-09-01

资助项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2017]2520-1号); 国家林业局项目(林资发[2011]248号); 贵州省林业厅项目(黔林资复[2012]331号)

第一作者: 杨家慧(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事森林水土保持研究。E-mail: 1830089018@qq.com

通信作者: 谭伟(1973—), 男, 教授, 主要从事森林可持续经营、林业信息与3S研究。E-mail: wtan@gzu.edu.cn

了研究,但针对同一树种整个生长阶段枯落物的水源涵养能力的研究相对较少。已有研究^[9-11]表明,不同林龄的凋落物累积量和分解速率之间存在差异,对林地的水源涵养能力有较大影响。

柳杉(*Cryptomeria fortune* (Lamb.) Hook.)是我国南方的一种常见针叶林,具有分布广、生长快、树形通直等特点,它是中国南方快速生长和高产的木材之一^[12]。目前,关于柳杉的研究多集中在生长规律、病虫害、生物量、碳氮储量分配、林窗、群落结构、经济效益评价等方面^[13-17],且研究区大多集中在福建、四川和桂东南。在柳杉人工林广泛种植的黔中地区,尤其在整個生长期內,对森林枯落物水源涵养能力的研究尚有不足,而这对准确评价柳杉人工林生态效益以及制定合理的水土保持措施十分重要。为此,本研究以安顺市平坝区大坡林场柳杉人工林为研究对象,对 5 个龄组的柳杉人工林枯落物储量及持水特性进行研究,并利用熵权法分别探究 5 个龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力,为该区域柳杉人工林水土保持措施的确定和实施及生态效益评价提供科学依据。

1 试验地概况

研究区位于安顺市平坝区大坡林场,地处平坝西北部,海拔 1 350~1 600 m,地形呈南北走向。全年气候温润,年平均气温 18.1 ℃,年平均降水量 1 300 mm,相对湿度 83%,属亚热带湿润季风气候。土壤类型主要为黄壤和黄棕壤,土壤母质以沉积岩为主,主要类型为页岩和砂页岩,土壤呈酸性,pH 介于 4~7,水肥条件好,比较适宜柳杉、华山松、马尾松等各种阔叶乔木树种的生长。研究区与十字乡、齐伯乡、乐平乡接壤,经营林木总面积 680 hm²,平坝区国营大坡林场植被主要为人工栽植,有柳杉(*Cryptomeria fortune* (Lamb.) Hook.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、华山松(*Pinus armandii* Franch.)、竹林(*Bamboo*)等。

平坝区大坡林场总面积 680 hm²,林地面积为 663.19 hm²,森林覆盖率达 92.30%,主要栽植柳杉、杉木、华山松和马尾松,公益林面积为 213.71 hm²,商品林面积为 456.67 hm²,分别占林地面积的 31.14%和 68.86%。非林地面积为 16.81 hm²,占 2.47%。大坡林场立地条件较好,森林资源丰富,林木蓄积量 118 620.4 m³,林木平均产量 178.86 m³/hm²。其中以柳杉为主的优势树种面积为 233.52 hm²,蓄积量 32 858.8 m³,分别占林地的 35.21%和 27.70%。

2 研究方法

2.1 样地选择与设置

对于柳杉人工林龄组的划分,国家林业局《森林

资源规划设计调查主要技术规定》(2003)和《国家森林资源连续清查技术规定》(2003)中定义:柳杉人工林幼龄林≤10 年,中龄林为 11~20 年,近熟林为 21~25 年,成熟林为 26~35 年,过熟林≥36 年。通过平坝林业部门获取研究区的地形图、影像数据及林场林班数据库,在野外详细调查的基础上,于 2018 年 10 月在大坡林场选择相邻分布,立地条件接近相同的柳杉人工林,在幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林 5 个龄组设置样地,样地面积为 20 m×30 m。每个龄组设置 3 组重复,共 15 个样地。对各样地内林木的林龄、坡向、坡度、胸径、树高、冠幅进行调查,样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

龄组	样地号	林龄/ a	坡向	坡度/ (°)	林分密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m
幼龄林	1	8	南向	30	2583	9.60	6.1
	2	10	东南向	28	3133	11.10	7.3
	3	10	南向	31	1700	15.10	9.9
中龄林	1	15	东南向	33	1433	21.30	16.5
	2	15	南向	30	1417	19.90	16.4
	3	18	东南向	27	1583	18.10	12.8
近熟林	1	24	南向	28	1617	22.50	21.4
	2	24	南向	31	1567	24.95	20.1
	3	23	东南向	29	1800	20.50	20.1
成熟林	1	28	南向	29	950	28.69	20.6
	2	30	东南向	25	1817	20.60	20.9
	3	30	东南向	32	967	29.41	22.4
过熟林	1	36	南向	33	883	34.90	26.8
	2	37	东南向	29	650	34.63	27.0
	3	39	南向	31	583	38.56	24.9

2.2 枯落物层数据测定

2.2.1 枯落物蓄积量及含水量测定 在样地内,选取样地的 4 个角及中心点各设置 1 m×1 m 的小样方,测量各小样方内枯落物的厚度,并在小样方内分未分解层和半分解层进行枯落物的收集,将枯落物装进档案袋后快速称量鲜重,然后带回实验室放入烘箱进行烘干,再次称量其干重,并计算枯落物的蓄积量和自然含水量^[18]。计算公式为:

$$W_0=M_1-M_0 \tag{1}$$

$$R_0=\frac{W_0}{M_0}\times 100\% \tag{2}$$

式中:W₀为枯落物自然含水量(g);M₁为枯落物鲜重(g);M₀为枯落物烘干后的质量(g);R₀为枯落物自然含水率(%)。

2.2.2 枯落物持水量(率)的测定 采用室内连续浸泡法对 5 种不同龄组枯落物的持水量和吸水速率进行测定,将档案袋内的样品转入尼龙袋,将其放入装满水的实验池中进行浸泡,并在 0.25、0.5、1、2、4、8、12、24 h 时称量枯落物的重量,计算枯落物的持水量

和持水速率^[19]。计算公式为：

$$W_1=M_{24}-M_0$$

(3)

$$R_m=\frac{W_1}{M_0}\times 100\%$$

(4)

式中： W_1 为枯落物最大持水量(g)； M_{24} 为枯落物浸泡 24 h 后的质量(g)； M_0 为枯落物烘干后的质量(g)； R_m 为枯落物最大持水率(%)。

2.2.3 枯落物有效拦蓄量和最大拦蓄量的计算 枯落物对降雨的实际拦蓄量可以通过枯落物的有效拦蓄量和最大拦蓄量得出^[18]。计算公式为：

$$W_m=(R_m-R_0)\times M$$

(5)

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

(6)

式中： W_m 为枯落物最大拦蓄量(t/hm²)； W 为枯落物有效拦蓄量(t/hm²)； R_m 为枯落物最大持水率(%)； R_0 为枯落物自然含水率(%)； M 为枯落物蓄积量(t/hm²)；0.85 为有效拦蓄系数。

2.3 水源涵养综合评价

本研究采用熵权法对 5 个龄组柳杉人工林枯落物的水源涵养能力进行综合评价,熵权法的客观权重根据指标变异的程度来确定。一般来说,如果某个指标的信息熵 E_i 越小,表明指标值的变异程度越大,在综合评价中起到的作用也越大,其权重也就越大,反之亦然^[6]。

(1)根据公式求各指标的熵值,记为 E_j ,计算公式为：

$$E_j=-\ln(m)^{-1}\sum_{i=1}^mp_{ij}\ln p_{ij}$$

($i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n$)

(7)

表 2 5 个龄组柳杉人工林枯落物总厚度与蓄积量

龄组	枯落物层 总厚度/cm	枯落物总蓄积量/ (t·hm ⁻²)	未分解层		半分解层	
			蓄积量/(t·hm ⁻²)	比例/%	蓄积量/(t·hm ⁻²)	比例/%
幼龄林	2.06±0.15d	1.03±0.27c	0.37±0.04d	35.92	0.66±0.23c	64.08
中龄林	3.36±0.25c	1.24±0.21c	0.72±0.09c	58.06	0.52±0.12c	41.94
近熟林	6.78±0.34b	3.94±0.46a	2.03±0.15ab	51.52	1.91±0.31a	48.48
成熟林	7.40±0.27a	4.49±0.44a	2.21±0.28a	49.22	2.28±0.16a	50.78
过熟林	3.68±0.38c	3.10±0.30b	1.76±0.12b	56.77	1.34±0.18b	43.23

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

3.1.2 枯落物持水量(率) 从表 3 可以看出,5 个龄组的枯落物最大持水量为 1.02~6.46 t/hm²,依次为成熟林(6.46 t/hm²)>近熟林(5.99 t/hm²)>过熟林(4.23 t/hm²)>中龄林(1.51 t/hm²)>幼龄林(1.02 t/hm²)。最大持水率为 225.21%~304.38%,依次为

$$p_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^mr_{ij}}$$

(假定 $f_{ij}=0$ 时, $f_{ij}\ln f_{ij}=0$)

式中： E_j 为熵值； p_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个龄组的指标值的比重； i 表示龄组类型数； j 表示评价指标数。

(2)根据公式求各指标的权重,记为 w_j ,权重计算公式为：

$$W_j=\frac{1-E_j}{n-\sum_{j=1}^nE_j}$$

($j=1,\cdots,n$)

(8)

式中： w_j 为权重； E_j 为熵值； j 为评价指标数。

3 结果与分析

3.1 枯落物层水源涵养能力

3.1.1 枯落物蓄积量 枯落物蓄积量是表征林分枯落物水源涵养能力的指标之一^[20]。从表 2 可以看出,5 个龄组柳杉人工林的枯落物总厚度为 2.06~7.40 cm,依次为成熟林(7.40 cm)>近熟林(6.78 cm)>过熟林(3.68 cm)>中龄林(3.36 cm)>幼龄林(2.06 cm)。枯落物的总蓄积量为 1.03~4.49 t/hm²,依次为成熟林(4.49 t/hm²)>近熟林(3.94 t/hm²)>过熟林(3.10 t/hm²)>中龄林(1.24 t/hm²)>幼龄(1.03 t/hm²)。5 个龄组的未分解层与半分解层所占比例有所差异,其中中龄林、近熟林和过熟林未分解层所占比例大于半分解层,而幼龄林和成熟林半分解层所占比例大于未分解层。幼龄林未分解层所占比例最小,占总蓄积量的 35.92%,中龄林则最大,占总蓄积量的 58.06%。

近熟林(304.38%)>成熟林(287.60%)>过熟林(275.16%)>中龄林(245.99%)>幼龄林(225.21%)。随着柳杉的生长,枯落物的持水量及持水率呈先增加后降低的趋势,其中成熟林的持水量最大,而持水率为近熟林最高。

表 3 5 个龄组柳杉人工林枯落物最大持水量和持水率

龄组	最大持水量/(t·hm ⁻²)			最大持水率/%		
	未分解层	半分解层	平均	未分解层	半分解层	平均
幼龄林	0.77±0.21c	1.26±0.26c	1.02	208.11±15.82c	242.31±21.23c	225.21
中龄林	1.67±0.35c	1.35±0.17c	1.51	231.52±12.39bc	260.45±23.47bc	245.99
近熟林	6.18±1.08a	5.81±2.08ab	5.99	304.56±21.35a	304.19±31.24a	304.38
成熟林	5.86±1.31ab	7.06±2.34a	6.46	265.14±18.57b	310.05±21.62a	287.60
过熟林	4.55±0.89b	3.91±1.12bc	4.23	258.52±26.59b	291.79±18.53ab	275.16

3.1.3 枯落物有效拦蓄量(率) 由表4可以看出,5个龄组的枯落物有效拦蓄率为138.47%~175.74%,大小依次为成熟林(175.74%)>近熟林(173.15%)>过熟林(167.33%)>中龄林(148.74%)>幼龄林(138.47%)。有效拦蓄量为0.73~3.94 t/hm²,大小依次为成熟

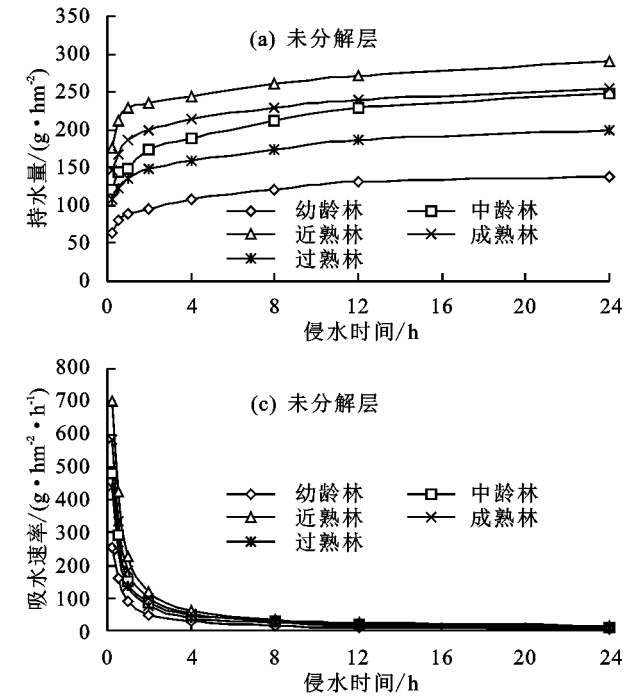
林(3.94 t/hm²)>近熟林(3.40 t/hm²)>过熟林(2.61 t/hm²)>中龄林(0.93 t/hm²)>幼龄林(0.73 t/hm²)。随着柳杉的生长,枯落物的有效拦蓄率及有效拦蓄量均表现出先增加后降低的趋势,综合5个龄组枯落物的降雨拦蓄变化来看,成熟林的拦蓄能力最强。

表4 5个龄组柳杉人工林枯落物有效拦蓄率和有效拦蓄量

龄组	有效拦蓄率/%			有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)		
	未分解层	半分解层	平均	未分解层	半分解层	平均
幼龄林	127.98±12.97b	144.71±36.89c	138.47	0.48±0.10b	1.01±0.57bc	0.73
中龄林	155.47±12.89ab	140.12±32.2c	148.74	1.13±0.23b	0.75±0.34c	0.93
近熟林	150.88±23.24ab	194.41±33.97a	173.15	3.08±0.69a	3.78±1.25a	3.40
成熟林	181.61±19.40a	169.43±22.02b	175.74	4.05±0.94a	3.88±0.77a	3.94
过熟林	171.90±24.02a	162.16±20.45b	167.33	3.05±0.63a	2.20±0.57b	2.61

3.1.4 枯落物持水过程 枯落物经过浸泡以后呈现出一定的规律,由图1a、图1b可以看出,5个龄组的不同分解层枯落物其持水量均随着浸水时间的加长而不断增加,而持水速率不断减小。各层枯落物均在浸水2 h内持水量迅速增加,随着浸泡时间的增加,持水量增加速度减缓。最后到24 h时,枯落物的持水量达到饱和状态,此时的持水速率最小。柳杉人工林未分解层枯落物的持水能力表现为近熟林>成熟林>中龄林>过熟林>幼龄林,半分解层枯落物持水能力表现为近熟林>成熟林>过熟林>中龄林>幼龄林。随着柳杉的生长,枯落物的持水能力呈先增加后减少的趋势。从表5可以看出,通过对5个龄组枯落物的持水量与浸水时间进行回归分析,其持水量与浸水时间呈对数函数关系:

$$Q=a\ln(t)+b$$
 (9)



式中:Q为枯落物持水量(t/hm²);t为浸水时间(h);a为系数;b为待估常数。

由图1c、图1d可以看出,5个龄组的不同分解层枯落物其吸水速率均随着浸水时间的加长而不断减小,在起初浸水1 h内吸水速率最大,之后吸水速率迅速下降,在8 h时下降速率趋于平缓,在8~24 h时,枯落物的吸水速率趋于稳定。随着浸泡时间的延长,枯落物吸水速率趋于一致,说明枯落物已经到达饱和状态。从表5可以看出,通过对5个龄组枯落物的吸水速率与浸水时间进行回归分析,其吸水速率与浸水时间呈幂函数关系:

$$v=kt^n$$
 (10)

式中:v为枯落物吸水速率(g/(hm²·h));k为系数;n为指数。

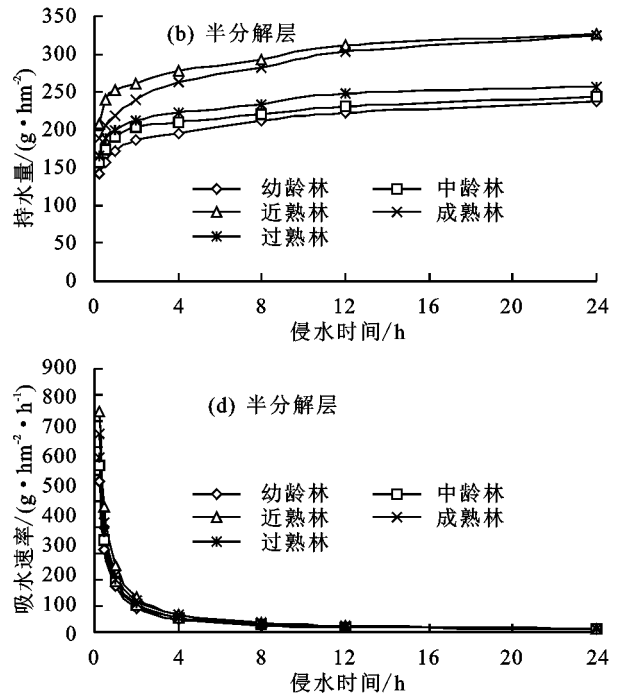


图1 5个龄组柳杉人工林枯落物持水量、吸水速率随时间的变化

表 5 5 个龄组柳杉人工林枯落物持水量、吸水速率与浸水时间关系

枯落物层	龄组	持水量与浸水时间关系式	R^2	吸水速率与浸水时间关系式	R^2
未分解层	幼龄林	$y=15.998\ln t+87.767$	0.9934	$y=85.618x^{-0.838}$	0.9993
	中龄林	$y=27.629\ln x+156.49$	0.9852	$y=153.47x^{-0.846}$	0.9996
	近熟林	$y=22.348\ln x+218.33$	0.9591	$y=216.52x^{-0.902}$	0.9992
	成熟林	$y=23.028\ln x+182.20$	0.9957	$y=180.10x^{-0.883}$	0.9996
	过熟林	$y=19.399\ln x+135.75$	0.9945	$y=134.04x^{-0.870}$	0.9999
半分解层	幼龄林	$y=20.448\ln x+170.86$	0.9949	$y=169.23x^{-0.891}$	0.9998
	中龄林	$y=18.110\ln x+186.65$	0.9871	$y=185.42x^{-0.908}$	0.9997
	近熟林	$y=24.075\ln x+247.91$	0.9818	$y=246.32x^{-0.909}$	0.9996
	成熟林	$y=29.904\ln x+224.26$	0.9880	$y=221.86x^{-0.880}$	0.9999
	过熟林	$y=19.337\ln x+197.16$	0.9878	$y=195.52x^{-0.908}$	0.9997

3.2 枯落物水源涵养能力综合评价

采用熵权法对枯落物的厚度、蓄积量、最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量、有效拦蓄率 6 个指标进行综合评价,综合 6 个指标的权重赋值来评价柳杉人工林 5 个龄组枯落物的水源涵养能力。对 6 个评价指标的数据进行标准化处理,再根据公式(7)和公式(8)算出各指标的信息熵值和权重,最后根据计算出的指标权重对 5 个龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力进行评分(表

6)。利用熵权法计算得出的权重为厚度占 15.94%,蓄积量占 23.64%,最大持水量占 30.94%,最大持水率占 0.97%,有效拦蓄率占 0.1%,有效拦蓄量占 28.58%。对林分枯落物水源涵养能力进行综合评价时,更多考虑枯落物最大持水量、有效拦蓄量、蓄积量及厚度。从评分结果来看,柳杉人工林 5 个龄组枯落物的水源涵养能力为成熟林(11.46)>近熟林(10.79)>过熟林(8.26)>中龄林(4.83)>幼龄林(3.94)。

表 6 5 个龄组枯落物水源涵养能力评价

龄组	厚度	蓄积量	最大持水量	最大持水率	有效拦蓄率	有效拦蓄量	水源涵养能力
幼龄林	0.33	0.24	0.63	2.18	0.14	0.42	3.94
中龄林	0.54	0.29	0.93	2.39	0.15	0.53	4.83
近熟林	1.08	0.93	3.71	2.95	0.17	1.94	10.79
成熟林	1.18	1.06	4.00	2.79	0.18	2.25	11.46
过熟林	0.59	0.73	2.62	2.67	0.17	1.49	8.26

4 讨论

枯落物厚度及蓄积量主要受林分类型、林龄、密度、地形因素、人为活动、气候条件以及枯落物自身性质、分解速率、累积年限等的影响^[21]。通过对 5 个龄组柳杉人工林枯落物的蓄积量及厚度进行分析研究,各林龄段枯落物未分解层、半分解层蓄积量及总蓄积量变化趋势相同。彭云等^[22]认为,正常条件下,同一林分随着林龄的增加,枯落物总蓄积量呈现增长趋势。本研究表明,随着柳杉的生长,枯落物厚度及蓄积量均表现为成熟林>近熟林>过熟林>中龄林>幼龄林。可能是因为随着柳杉的生长,其冠幅变大,枝叶茂盛,当生长到成熟林时,柳杉林分结构趋于完善,枯落物积累逐渐增多,枯落物的输出量和蓄积量处于最佳时期。到过熟林时,林木生长到一定程度,林木树冠生长会减少,受林分林龄、冠幅、郁闭度的影响^[23],所以枯落物厚度及蓄积量减小。郭梦娇等^[24]研究发现,在气候、立地条件等外部因素相同的条件下,林分的结构是影响枯落物存量的重要原因,随着林龄增加,林分的密度、郁闭度等发生变化,进而影响

枯落物的蓄积。5 个龄组的未分解层与半分解层所占比例有所差异,其中中龄林、近熟林和过熟林未分解层所占比例大于半分解层,而幼龄林和成熟林半分解层所占比例大于未分解层,幼龄林未分解层所占比例最小,中龄林最大。可能是因为枯落物输入量和分解速率不同,林地枯落物各分解层所占比例主要是由枯落物自身的特性和所处的环境决定^[22],中龄林林分生长代谢快,幼龄林未分解层仅为松针和少量细枝。

枯落物最大持水量能够反映其最大持水潜力,最大持水率能够反映其持水能力,但一般是通过有效拦蓄量来体现枯落物的真实拦蓄能力^[6]。本研究表明,各林龄段枯落物未分解层、半分解层最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量及有效拦蓄率变化趋势相同。随着柳杉的生长,枯落物的各项持水性指标均呈先增加后降低的趋势,成熟林枯落物的持水量及拦蓄雨水能力最佳,可能与成熟林枯落物厚度及蓄积量最大有关。随着柳杉的生长,其冠幅变大,枝叶茂盛,林冠对降雨的截留能力加强,枯落物逐渐增多,枯落物的拦蓄能力也随之得到加强,而且受地形因素的影响,地表含水量存在差异^[25-26],进而影响枯落物的持水特

性。此外,受林分结构、积累时间、分解速率及人类活动等因素的影响^[21],枯落物的分解速度及分解程度不同会影响其持水特性。有研究^[27]表明,林地枯落物的持水量与其分解程度有很大关系,未分解层持水量大于半分解和已分解枯落物。本研究结果与前人^[27]的研究结果不同,主要原因可能与不同林龄柳杉人工林林枯落物现存量、自身性质及分解速率有关。本研究采用室内浸泡法测定枯落物持水特性,只能在一定程度上反映枯落物拦蓄降雨的能力,在真实降雨情况下的拦蓄能力还有待进一步验证。

5 个龄组的未分解层和半分解层枯落物持水量均随着浸水时间的加长而不断增加,而持水速率不断减小。各层枯落物在浸水 2 h 内持水量迅速增加,随着浸泡时间的增加,持水量增加速度减缓。本研究发现,各龄组半分解层和未分解层枯落物持水量与浸水时间呈 $Q=a\ln(t)+b$ 的对数增长, R^2 为 0.959 1~0.995 7,与袁秀锦等^[28]和熊壮等^[29]的研究结果相似。5 个龄组的未分解层和半分解层枯落物吸水速率均随着浸水时间的加长而不断减小,在起初浸水 1 h 内吸水速率最大,之后吸水速率迅速下降,最后趋于平缓。说明枯落物在浸水的 1 h 内吸水速率较快,枯落物对降水的拦蓄能力较强,吸水速率减小,枯落物拦蓄降水的能力随着减弱。5 个龄组半分解层和未分解层枯落物吸水速率与浸水时间呈 $v=kt^n$ 的幂函数关系, R^2 为 0.999 2~0.999 9,与陈进等^[9]和侯贵荣等^[30]的研究结果相似。

枯落物持水能力主要取决于枯落物的厚度、蓄积量、最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量和有效拦蓄率。通过对柳杉人工林 5 个龄组枯落物的水源涵养功能进行综合评价,随着柳杉的生长发育,其水源涵养能力呈现先增加后减小的趋势,成熟林的水源涵养功能最佳,幼龄林水源涵养功能最差。但本文仅对不同龄组柳杉人工林枯落物的水源涵养能力进行了分析研究,森林的水源涵养是通过林冠层、枯落物层和土壤层对降水再分配,从而有效涵养水分,调节径流^[21]。因此,在以后评价不同林龄的水源涵养功能时,应该考虑林冠层和土壤层的综合水文效应,更详细地对柳杉人工林的水源涵养功能进行评价。

5 结论

(1)对柳杉人工林 5 个龄组枯落物的水文特性进行分析,枯落物的厚度、蓄积量、持水量(率)、有效拦蓄量(率)均随柳杉的生长发育呈现先增加后减小的趋势。

(2)对柳杉人工林 5 个龄组枯落物的水源涵养功能进行综合评价,柳杉人工林 5 个龄组枯落物的水源涵养能力为成熟林>近熟林>过熟林>中龄林>幼龄林。

参考文献:

[1] 孙向阳,王根绪,吴勇,等.川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应[J].生态学报,2013,33(2):501-508.

[2] 王忠禹,王兵,刘国彬,等.黄土丘陵区典型植被枯落物坡面分布及混入土壤对土壤性状的影响[J].自然资源学报,2018,33(11):2020-2031.

[3] 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.

[4] Gong S H, Xiao Y, Xiao Y, et al. Driving forces and their effects on water conservation services in forest ecosystems in China[J]. Chinese Geographical Science, 2017,27(2):216-228.

[5] 余新晓,周彬,吕锡芝,等.基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J].林业科学,2012,48(10):1-5.

[6] 杨良辰,张春茹.沿坝地区 3 种典型林分类型枯落物层与土壤层水源涵养能力综合评价[J].水土保持研究,2018,25(6):177-182.

[7] Shi M L I, Gao D X, Cai X Z, et al. Flow process of water conservation service of forest ecosystem[J]. Journal of Natural Resources,2010,25(4):585-593.

[8] 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.

[9] 陈进,徐明,邹晓,等.贵阳市不同林龄马尾松林凋落物储量及持水特性[J].水土保持研究,2018,25(6):146-151.

[10] 石亮,舒洋,张波,等.不同龄组兴安落叶松林枯落物的水文效应[J].水土保持通报,2016,36(5):91-95.

[11] 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.

[12] 郝建锋,李艳,王德艺,等.雅安市谢家山两种密度柳杉人工林群落结构和物种多样性研究[J].生态环境学报,2015,24(2):217-223.

[13] Li G H, Wen G S, Tian H T, et al. Gall disease of *Cryptomeria fortunei* at different altitudes on Mount Tianmu, Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010,27(4):483-488.

[14] Qin S J, Li K, Mo D X, et al. Biomass regression model of the *Cryptomeria fortunei* plantation in south-east subtropical region of Guangxi. [J]. Journal of Southern Agriculture, 2013,44(2):261-265.

[15] 张勇,王增,黄玉洁,等.凤阳山 4 种森林土壤在不同温度培养下活性有机碳的变化[J].浙江农林大学学报,2018,35(2):243-251.

[16] 蒋倩,姚俊宇,伍炫蓓,等.川西周公山柳杉人工林林窗大小对土壤理化性质和物种多样性的影响[J].生态与农村环境学报,2018,34(4):326-332.

- and biochar and leached with reclaimed water[J]. *Geoderma*, 2015, 259/260: 45-55.
- [17] Wu Y, Xu G, Shao H B. Furfural and its biochar improve the general properties of a saline soil[J]. *Solid Earth*, 2014, 5: 665-671.
- [18] Lin X W, Xie Z B, Zheng J Y, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66: 329-338.
- [19] Sun J N, Wang B C, Xu G, et al. Effects of wheat straw biochar on carbon mineralization and guidance for large-scale soil quality improvement in the coastal wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 43-47.
- [20] 丛宏斌, 姚宗路, 赵立欣, 等. 内加热连续式生物质炭化中试设备炭化温度优化试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 235-240.
- [21] 李飞跃, 梁媛, 汪建飞, 等. 生物炭固碳减排作用的研究进展[J]. *核农学报*, 2013, 27(5): 681-686.
- [22] 姜志翔. 生物炭技术缓解温室气体排放的潜力评估[D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [23] 丛宏斌, 赵立欣, 姚宗路, 等. 我国生物质炭化技术装备研究现状与发展建议[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(2): 21-26.
- [24] 陶园, 王少丽, 许迪, 等. 改进暗管排水技术淤堵防护措施试验研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 187-192.
- [25] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 1-7.
- [26] 杜勇. 生物炭固定化微生物去除水中苯酚的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [27] 秦传玉, 赵勇胜, 郑苇. 表面活性剂强化空气扰动技术修复机理[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(2): 138-142.
- [28] 郭新送, 宋付朋, 鞠正山. 不同土水比土壤浸提液与饱和泥浆电导率的比较研究[J]. *土壤*, 2015, 47(4): 812-818.
- [29] 叶海燕. 微咸水利用试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004: 17-20.
- [30] 马东豪, 王全九, 苏莹, 等. 微咸水入渗土壤水盐运移特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(1): 62-66.
- [31] 翟亚明, 何德舜, 季亚辉. 天津滨海地区原生盐碱土盐分淋洗规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(5): 65-68.
- [32] 程镜润, 陈小华, 刘振鸿, 等. 脱硫酸石膏改良滨海盐碱土的脱盐过程与效果实验研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(6): 1505-1513.
- [33] 罗雪园, 周宏飞, 柴晨好, 等. 不同淋洗模式下干旱区盐渍土改良效果分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 322-326.
- [34] 尹春艳, 陈小兵, 刘虎, 等. 不同淋洗条件下黄河三角洲盐渍土脱盐规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(3): 76-82.
- (上接第 301 页)
- [17] 覃世杰, 覃德文, 聂珍臻, 等. 柳杉人工林经济效益评价[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(1): 269-273.
- [18] 王会京, 王红霞, 谢宇光. 太行山不同林型枯落物持水性及生态水文效应研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 135-139.
- [19] 金雅琴, 李冬林, 孙丽娟, 等. 南京近郊人工林地表枯落物的累积量及持水性[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(5): 95-104.
- [20] 冯宜明, 李毅, 曹秀文, 等. 甘肃亚高山云杉人工林土壤特性及水源涵养功能对林分密度的响应特征[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1529-1541.
- [21] 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.
- [22] 彭云, 丁贵杰. 不同林龄马尾松林枯落物储量及其持水性能[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(4): 43-46.
- [23] 张建华, 郭宾良, 张宁, 等. 滦河上游不同密度油松林水源涵养功能研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 47-50.
- [24] 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, 30(3): 279-284.
- [25] 邵臻, 张富, 陈瑾, 等. 陇中黄土丘陵沟壑区不同土地利用下土壤水分变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(12): 129-135.
- [26] Lai X M, Zhu Q, Zhou Z W, et al. Influences of sampling size and pattern on the uncertainty of correlation estimation between soil water content and its influencing factors[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 41-50.
- [27] 李文影, 满秀玲, 张阳武. 不同林龄白桦次生林土壤特性及其水源涵养功能[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 63-69.
- [28] 袁秀锦, 王晓荣, 潘磊, 等. 肖文发. 三峡库区不同类型马尾松林枯落物层持水特性比较[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 160-166.
- [29] 熊壮, 叶文, 张树斌, 等. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林凋落物的持水特性[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(6): 1054-1061.
- [30] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 等. 黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 357-363.