

晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究

周巧稚¹, 毕华兴^{1,2,3,4,5,6}, 孔凌霄¹, 侯贵荣¹, 魏曦¹, 魏小燕¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 3. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206;

4. 水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学), 北京 100083; 5. 北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学), 北京 100083; 6. 林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学), 北京 100083)

摘要: 为对比分析林分密度对枯落物层水文生态功能的影响, 以晋西黄土区 6 种不同密度(475, 900, 1 200, 1 575, 1 825, 2 350 株/hm²)刺槐(*Robinia pseuodoacacia*)人工林为对象, 采用样地调查与室内试验相结合的方法, 对其枯落物层总厚度、总蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量、枯落物持水量与浸水时间的关系、枯落物吸水速率与浸水时间的关系等水文特征进行研究, 以期从中提出该区刺槐林经营的合理密度, 为充分发挥水土保持功能、实现功能导向型植被调控与优化配置提供理论依据。结果表明: (1) 研究区 6 种密度刺槐人工林枯落物总厚度变化范围为 28.67~54.33 mm, 总蓄积量为 2.98~10.65 t/hm², 且在一定范围内, 随林分密度增大, 枯落物蓄积量出现先增加后减少的变化趋势, 6 种密度枯落物蓄积量由大到小依次为 1 575 株/hm²>1 825 株/hm²>1 200 株/hm²>900 株/hm²>2 350 株/hm²>475 株/hm²; (2) 枯落物最大持水率的变动范围为 295.35%~427.84%, 无明显的规律性; 最大持水量为 11.16~37.01 t/hm², 在一些林分间差异显著, 表现为随密度的增加呈先增大后减小的趋势, 密度为 1 575 株/hm² 的林分枯落物持水性能表现最好, 达 37.01 t/hm²; 半分解层枯落物持水量均高于未分解层; 不同密度刺槐林枯落物的吸水速率与密度关系不显著; (3) 各林分枯落物有效拦蓄量为 7.22~23.64 t/hm², 其中以 1 575 株/hm² 的有效拦蓄能力最强, 为 23.64 t/hm²; (4) 枯落物持水量与浸水时间之间存在明显的对数函数关系: $Q = a \ln t + b$, $R^2 > 0.95$; 枯落物吸水速率与浸水时间之间存在明显的幂函数关系: $V = kt^n$, $R^2 > 0.99$ 。综上所述, 在本研究范围内, 林分密度在 1 575 株/hm² 时枯落物层表现出较好的水文生态功能, 当密度低于 1 200 株/hm², 枯落物层水文效应急剧下降; 从枯落物水文功能角度, 建议今后研究区刺槐林的经营密度以 1 200~1 800 株/hm² 为适宜调控范围。

关键词: 晋西黄土区; 刺槐林; 林分密度; 枯落物; 水文生态功能

中图分类号: S715.7; S792.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0115-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.018

Hydrological and Ecological Functions of Litter Layer Under *Robinia pseuodoacacia* Plantation with Different Densities in Loess Region of Western Shanxi Province

ZHOU Qiaozhi¹, BI Huaxing^{1,2,3,4,5,6}, KONG Lingxiao¹, HOU Guirong¹, WEI Xi¹, WEI Xiaoyan¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing 100083; 3. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 102206; 4. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 5. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 6. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083)

Abstract: In order to compare and analyze the impacts of stand density on hydrological and ecological functions of litter layer, the *Robinia pseuodoacacia* plantations with 6 different densities (475, 900, 1 200, 1 575, 1 825 and 2 350 trees/hm²) in Loess region of Western Shanxi Province were chosen as the object. By the methods of

收稿日期: 2018-02-05

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄土残塬沟壑区水土保持型景观优化与特色林产业技术及示范”(2016YFC0501704); 科技创新服务能力
建设—科研基地建设—林果业生态环境功能提升协同创新中心项目(PXM2018_014207_000024)

第一作者: 周巧稚(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事森林水文研究。E-mail: 736050549@qq.com

通信作者: 毕华兴(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与林业生态工程。E-mail: bhx@bjfu.edu.cn

field survey and laboratory experiment, the hydrological characteristics of litter layer, such as the litter total storage capacity, the maximum water holding capacity and modified interception capacity and their relationships with soaking time, were studied, aimed to propose the reasonable density of the *Robinia pseuodoacacia* management in this area and provide scientific basis for giving full play to soil and water conservation functions as well as achieving function-oriented vegetation regulation and optimal allocation. The results showed that: (1) The litter total thickness of *Robinia pseuodoacacia* plantations with 6 densities ranged from 28.67 mm to 54.33 mm in the studied area. The total volume was about 2.98~10.65 t/hm², and in a certain stand density, the litter total storage capacity increased first and then decreased with the increase of densities, showing an order of 1 575 trees/hm²>1 825 trees/hm²>1 200 trees/hm²>900 trees/hm²>2 350 trees/hm²>475 trees/hm². (2) The maximum water holding rates varied from 295.35% to 427.84% with no obvious regularity. The maximum water holding capacity was 11.16~37.01 t/hm² and had significant differences among some plantations with different densities, which achieved the best (37.01 t/hm²) at 1 575 trees/hm². The water holding capacity in half-decomposed litter layers was higher than that in un-decomposed litter layers, but different stand densities had little effects on water absorption rates. (3) The modified interception capacity was about 7.22~23.64 t/hm² in different stands and the maximum was found in 1 575 trees/hm², reaching 23.64 t/hm². (4) Water holding capacity of litter had a logarithmic correlation with immersion time ($Q=aln t+b$, $R^2>0.95$), and water absorption rates showed a power function with soaking time ($V=kt^n$, $R^2>0.99$). In summary, within the scope of this study, the litter layer showed better hydrological and ecological function under plantation with around 1 575 trees/hm². When the density was lower than 1 200 trees/hm², it tended to drop sharply. From the perspective of litter hydrological function, it is recommended to maintain the rational stand density range of 1 200~1 800 trees/hm² in future *Robinia pseuodoacacia* plantation management of this area.

Keywords: Loess Region of Western Shanxi Province; *Robinia pseuodoacacia* plantation; stand density; litters; hydrological and ecological functions

森林结构决定其生态功能,林分密度作为林分结构的主要指标之一^[1],对其涵养水源^[2]、保持水土^[3]、固碳释氧^[4]、物种保育^[5]等生态功能有较大影响。枯枝落叶层作为林地表面的覆盖层与保护层,是森林生态系统结构的重要组成部分,与林冠层、土壤层共同构成了森林涵养水源的3个垂直层次^[6]。大气降水过程中,一部分被林冠层枝叶和树干所临时容纳,另一部分穿过林冠层,被枯落物截留并渗入土壤。枯落物层作为森林发挥水文生态功能的第二作用层,因其结构疏松,具有良好的透水性和持水能力^[7],可以有效地截持大气降水,抑制土壤水分蒸发,增加入渗,以减轻雨滴溅蚀及地表径流对土壤的侵蚀。枯落物层的分解还可增加土壤有机质,促进土壤形成和发育,为土壤生物提供养分与能量^[8]。研究^[9]表明,每年植物凋落物分解过程中释放的营养元素可满足69%~87%的森林生物生长所需量。

目前,国内外对不同森林类型的枯落物层水文功能已取得较为成熟的研究成果^[10~13],但对于林分密度对枯落物水文生态功能影响的报道较少。自1992年实施退耕还林还草工程以来,晋西黄土残塬沟壑区经过25年的植被恢复,形成了较为稳定的森林生态系

统。刺槐是该区分布广泛的主要造林树种之一,在防治水土流失、改善生态环境、调节水文状况等方面均发挥重要作用。本文以晋西黄土区6种不同密度刺槐林为研究对象,探讨林分密度对枯落物层水文生态功能的影响,以期从中提出该区刺槐林经营的合理密度,为充分发挥水土保持功能、实现功能导向型植被调控与优化配置提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于黄土高原西南部的山西省吉县蔡家川流域($36^{\circ}14'27''$ — $36^{\circ}18'23''$ N, $110^{\circ}39'45''$ — $110^{\circ}47'45''$ E),属于黄河三级支流,流域地势西高东低,东西狭长,流域面积39.33 km²,长约14 km,海拔900~1 513 m。该地区属暖温带大陆性气候,年均气温10℃,绝对最高气温38.1℃,绝对最低气温-20.4℃,≥10℃积温3 358℃,年光照时间2 563.8 h,无霜期172 d。流域多年平均降水量575.9 mm,其中最大年降水量达828.6 mm,最小年降水量仅为365.1 mm,最大降水变率为43.11%,年内降水分布不均,主要集中在6—9月,约占全年降水量的70%,年潜在蒸发量1 724 mm。研究区属于典型的黄土残塬沟壑区,土壤为微碱性褐土,黄土母质。流域森林覆盖率39.18%,上

游主要是由山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)等组成的天然次生林,中游为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等组成的人工林,下游为荒草坡和农地。流域内的林下灌木包括黄刺玫(*Rosa xanthina*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、杠柳(*Periploca sepium*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、丁香(*Syringa julianae*)等。草本层植物主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、苔草(*Carex tristachya*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、萝藦(*Metaplexis japonica*)、抱茎苦荬菜(*Ixeris sonchifolia*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

基于对研究区刺槐生长及分布状况的调查,于2017年8月在山西吉县蔡家川流域内,选取6块生境相近而密度不同的刺槐人工林布设标准样地。样地面积为20 m×20 m,林分密度分别为475,900,1 200,1 575,1 825,2 350株/hm²,选择的样地具有代表性和典型意义。通过每木检尺测定样地内刺槐树高、胸径、枝下高、冠幅等林分基本指标,采取树冠投影法估测林分郁闭度,使用LAI-2000植物冠层分析仪测定叶面积指数,并记录海拔、坡度、坡向等立地特征,样地基本概况见表1。

表1 不同密度标准地基本特征

样地 编号	林分密度/ (株·hm ⁻²)	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	林龄/ a	郁闭度	平均 树高/m	平均 胸径/cm	枝下高/ cm	冠幅/ m	叶面积 指数
I	475	1190	22	半阴坡	27	0.39	6.85	7.45	1.44	2.11	2.56
II	900	1160	39	半阴坡	27	0.55	10.22	14.45	2.79	2.93	3.38
III	1200	1140	24	半阴坡	27	0.62	10.79	14.31	3.87	2.56	4.07
IV	1575	1190	22	半阴坡	27	0.47	8.57	10.53	2.31	2.34	3.68
V	1825	1220	34	半阳坡	25	0.63	7.58	9.47	2.35	2.93	4.70
VI	2350	1190	27	半阳坡	25	0.53	7.76	8.52	2.56	2.05	3.81

2.2 枯落物蓄积量测定

在各标准地内,视地形变化情况设3个30 cm×30 cm的样方,调查样方内枯落物层厚度及蓄积量。用钢尺分别测量各样方内未分解层、半分解层枯落物厚度,取其平均值作为样地内枯落物层厚度。将样方内的所有枯落物在不破坏原有结构的情况下,分层收集到档案袋中,称其鲜重。带回实验室后置于85 ℃烘箱中烘干至恒重,称其质量,即为枯落物干重。

用单位面积枯落物的烘干质量来表示蓄积量,即:

$$M = G_d / S \times 100$$

式中:M为枯落物蓄积量(t/hm²);G_d为枯落物烘干状态的质量(g);S为单个样方面积(cm²)。

2.3 枯落物水文效应测定

采用室内浸泡法测定枯落物的持水量和吸水速率。将枯落物装入尼龙网袋后浸入水中,分别在浸泡0.25,0.5,1,2,4,6,12,24 h时取出控干,至枯落物不滴水为止,迅速称其质量并记录。

每次称重所得的枯落物湿重与其烘干重的差值,即为枯落物浸水不同时间的持水量,该值与浸水时间的比值即为枯落物的吸水速率。通常认为枯落物浸水24 h后的持水量为最大持水量,与其相对应的持水率为最大持水率。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:

$$R_0 = (G_0 - G_d) / G_d \times 100\%$$

$$R_{hmax} = (G_{24} - G_d) / G_d \times 100\%$$

$$R_{smax} = R_{hmax} - R_0$$

$$R_{sw} = 0.85 R_{hmax} - R_0$$

$$W_0 = R_0 \times M$$

$$W_{hmax} = R_{hmax} \times M$$

$$W_{smax} = R_{smax} \times M$$

$$W_{sw} = R_{sw} \times M$$

$$W = (G_w - G_d) \times 10$$

$$R = W / G_d \times 100 \times 100\%$$

$$V = W / t$$

式中:G₀、G_d、G₂₄、G_w分别为枯落物样品自然状态的质量、烘干状态的质量、浸水24 h后的质量、湿质量(g);R₀、R_{hmax}、R_{smax}、R_{sw}、R分别为枯落物自然含水率、最大持水率、最大拦蓄率、有效拦蓄率、持水率(%);M为枯落物蓄积量(t/hm²);W₀、W_{hmax}、W_{smax}、W_{sw}、W分别为枯落物自然含水量、最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量、持水量(t/hm²);V为枯落物吸水速率(t/(hm²·h));t为浸水时间(h);0.85为有效拦蓄系数。

2.4 数据处理

本文采取Excel 2010进行数据处理,利用SPSS 20.0中的单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)检验不同密度林分在各特征指标上的差异,采用Origin 9.0作图。

3 结果与分析

3.1 不同密度刺槐林枯落物厚度与蓄积量

枯落物蓄积量反映了枯落物输入量与分解程度之间的平衡关系,而这两个因子又是其他多种因素综合作用的结果:其一是森林植被本身特性,诸如林分树种组成、林龄、植被配置模式以及林木生长状况等;其二是外部环境因素,包括林分所处的水热条件、生长季节和人为活动等^[15]。

由表 2 可知,不同密度枯落物未分解层厚度在 12.67~19.67 mm,半分解层厚度在 15.67~34.67 mm;枯落物总厚度以样地Ⅳ最大,为 54.33 mm;样地Ⅰ和样地Ⅵ的最小,为 28.67 mm。LSD 多重比较表明,不同密度林分枯落物未分解层厚度之间无显著差异($P>0.05$),半分解层厚度及总厚度中,样地Ⅳ均显著大于样地Ⅰ、样地Ⅱ、样地Ⅴ和样地Ⅵ($P<0.05$)。

6 种不同密度林分枯落物总蓄积量存在一定差别,其变动范围为 2.98~10.65 t/hm²,平均为 7.05 t/hm²,总蓄积量大小依次是样地Ⅳ>样地Ⅴ>样地Ⅲ>样地Ⅱ>样地Ⅵ>样地Ⅰ,密度为 1 575 株/hm² 的样地枯落物总蓄积量最大(10.65 t/hm²),密度为 475 株/hm² 的样地枯落物总蓄积量最小(2.98 t/

hm²);样地Ⅰ与样地Ⅳ、样地Ⅴ差异显著($P>0.05$),枯落物总蓄积量随林分密度增加呈现出先增大后减小的趋势。这是因为密度增加导致林分凋落物量增多,且林内光照与温度下降,有利于枯落物积累;但林分密度超过一定范围后,随着郁闭度的增加,个体间争夺水分、养分、生长空间的竞争加剧,使得林木枝叶生长更新减缓,凋落量减少,再加上坡度、坡向等影响,故密度达到 1 575 株/hm² 之后枯落物蓄积量反而下降。未分解层样地Ⅱ占总蓄积量的比例最大,为 41.67%,样地Ⅳ占比例最小,为 30.71%,半分解层则相反。未分解层样地Ⅴ与样地Ⅵ差异显著($P>0.05$),主要原因是样地Ⅴ郁闭度和叶面积指数均高于样地Ⅵ,光照不足,导致枯落物不易分解。同一密度下,枯落物各层次蓄积量所占比例不同,半分解层蓄积量均大于未分解层,这可能是由于半分解层内部堆积紧密,孔隙小,质量相对较大造成的^[16]。

不同密度下的刺槐林,林木株数和生长发育状况的不同会引起枯落物输入量的差异;同时,不同密度下林内透光度、水分条件均不同,可加速或减缓枯落物的分解速度。综合上述两方面的作用,不同密度刺槐林枯落物厚度和蓄积量表现出不同程度的差异性。

表 2 不同密度刺槐林枯落物厚度与蓄积量

样地编号	厚度/mm		总厚度/mm	蓄积量/(t·hm ⁻²)		总蓄积量/(t·hm ⁻²)	蓄积量比例/%	
	未分解层	半分解层		未分解层	半分解层		未分解层	半分解层
I	13.00	15.67	28.67	1.12	1.86	2.98	37.55	62.45
II	12.67	17.67	30.33	2.46	3.45	5.91	41.67	58.33
III	16.33	23.33	39.67	2.61	5.73	8.34	31.29	68.71
IV	19.67	34.67	54.33	3.27	7.38	10.65	30.71	69.29
V	15.67	16.67	32.33	3.50	5.88	9.37	37.28	62.72
VI	12.67	16.00	28.67	1.87	3.20	5.07	36.90	63.10
平均	15.00	20.67	35.67	2.47	4.58	7.05	35.90	64.10

3.2 不同密度刺槐林枯落物水文效应

3.2.1 枯落物的持水能力 枯落物的持水能力是表征枯落物层水文功能的重要指标,常用枯落物最大持水量和最大持水率来表示。

由表 3 可知,6 种不同密度刺槐林枯落物最大持水率的变动范围为 295.35%~427.84%;最大持水

量为 11.16~37.01 t/hm²,排序为样地Ⅳ>样地Ⅲ>样地Ⅴ>样地Ⅱ>样地Ⅵ>样地Ⅰ,表现为随林分密度的增加先增大后减小的趋势,这与刘宇等^[17]的研究结果相近。经方差分析,样地Ⅰ的最大持水量与样地Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ差异显著,样地Ⅳ与样地Ⅱ、Ⅵ差异显著($P<0.05$)。

表 3 不同密度刺槐林枯落物的持水特性

样地编号	最大持水率/%			最大持水量/(t·hm ⁻²)			最大持水深/mm		
	未分解层	半分解层	平均	未分解层	半分解层	总计	未分解层	半分解层	总计
I	643.45	212.24	427.84	7.21	3.95	11.16	0.72	0.40	1.12
II	384.75	320.61	352.68	9.48	11.06	20.54	0.95	1.11	2.05
III	403.48	332.99	368.23	10.52	19.07	29.59	1.05	1.91	2.96
IV	378.75	333.92	356.33	12.38	24.63	37.01	1.24	2.46	3.70
V	333.47	257.24	295.35	11.66	15.12	26.78	1.17	1.51	2.68
VI	316.01	363.33	339.67	5.91	11.62	17.53	0.59	1.16	1.75

从表 3 还可看出,半分解层最大持水量普遍高于未分解层,说明枯落物半分解层具有更好的持水性

能,这与白英辰等^[18]的研究结果一致。当林分密度达到 1 575 株/hm² 时,枯落物最大持水量最大,达

37.01 t/hm²,相当于3.70 mm的水深,这主要是由于林分密度增加,枯落物厚度和蓄积量不断增大,且林下灌草数量增多,使得枯落物的持水能力也不断增强。在该结果中,密度较大的样地V(1 825株/hm²)、样地VI(2 350株/hm²)枯落物持水能力却处于后位,这是由于其他几块样地均位于半阴坡,而样地V、VI位于半阳坡,立地条件、水分状况、长势等均较差造成的。同一林分的最大持水量和最大持水率呈现出不同规律,这是因为最大持水量还与枯落物本身的生物量和结构有关,枯落物的分解状况同样影响持水能力。

3.2.2 枯落物的拦蓄能力 最大持水量测定的是将枯落物样品浸水24 h后的结果,而在自然条件下,落到林地表面的降水只有一部分被枯落物层拦蓄,其余部分很快便渗入土壤,不会出现长期浸水条件。因此,用最大持水量计算所得的最大拦蓄量来衡

量枯落物层实际拦蓄能力结果偏高,有效拦蓄量才是反映枯落物层对一次降水拦蓄的真实指标。

由表4可以看出,6种不同密度刺槐林枯落物的拦蓄能力不同。枯落物有效拦蓄率在部分林地间差异显著,其变化范围为202.41%~286.43%,但变化规律不明显。从有效拦蓄量来分析,未分解层和半分解层的变化规律基本一致,均随密度增加呈现出先增大后减小的趋势,且不同密度林分的半分解层有效拦蓄量普遍大于未分解层,说明半分解层在降雨拦蓄过程中起到重要作用。有效拦蓄量的变化范围为7.22~23.64 t/hm²,经方差分析,样地I与样地III、IV、V,样地IV与样地VI差异显著($P<0.05$)。样地IV的有效拦蓄量最大,为23.64 t/hm²,相当于拦蓄2.36 mm的降雨;样地III和V次之;样地I的有效拦蓄量最小,为7.22 t/hm²,只相当于拦蓄0.72 mm的降雨,即中密度林分枯落物拦蓄能力较强,低密度和高密度拦蓄能力较弱。

表4 不同密度刺槐林枯落物的拦蓄能力

样地 编号	有效拦蓄率/%			有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)			有效拦蓄水深/mm		
	未分解层	半分解层	平均	未分解层	半分解层	总计	未分解层	半分解层	总计
I	464.92	107.93	286.43	5.21	2.01	7.22	0.52	0.20	0.72
II	299.31	201.66	250.48	7.38	6.96	14.33	0.74	0.70	1.43
III	310.77	201.30	256.04	8.10	11.53	19.63	0.81	1.15	1.96
IV	276.79	197.82	237.30	9.05	14.59	23.64	0.90	1.46	2.36
V	245.49	159.33	202.41	8.58	9.37	17.95	0.86	0.94	1.79
VI	244.04	251.32	247.68	4.56	8.04	12.60	0.46	0.80	1.26

3.2.3 枯落物的持水过程 由图1可以看出,各林分不同层次的枯落物持水性能随浸泡时间具有相似的变化规律。在最初浸泡的2 h内,枯落物持水量迅速增加;浸水2~10 h,随着浸泡时间的延长,持水量持续增加,但增加速度逐渐放慢;10 h以后,持水量

变化趋于平缓,持水量逐渐达到饱和。这说明枯落物层对降雨的截留和拦蓄主要发生在降雨初期的2 h内,枯落物迅速拦截降雨以减小侵蚀。此后随着降雨继续,枯落物湿润程度不断增加,吸持能力逐渐降低,直至达到枯落物的最大持水量。

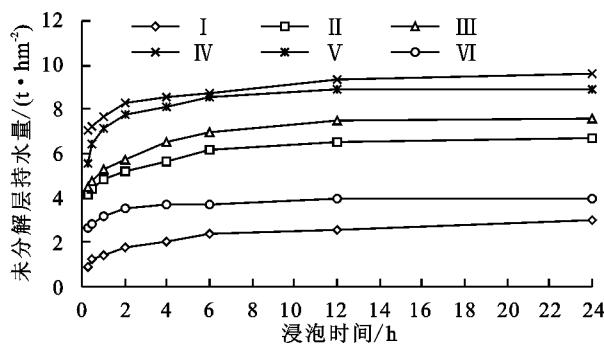
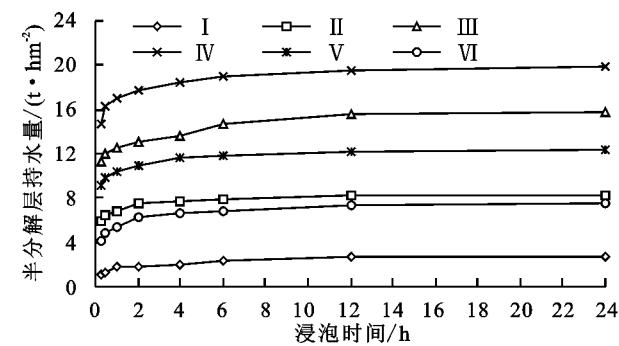


图1 枯落物不同层次持水量与浸泡时间的关系

从图1还可看出,样地III、IV、V的持水量均高于其他样地,表明中高密度林分枯落物持水量较大,这与枯落物蓄积量密切相关,密度越大,则枯落物蓄积量相对越多,持水量越高。

比较不同层次枯落物的持水过程可以发现,同一林分的半分解层持水量在不同时段基本均高于未分解层,这可能是由于经过一段时间分解,枯落物的表



面积增大,内部结构发生改变,亲水性更强而导致持水能力增强。

对浸水0.25~24 h的不同林分密度枯落物未分解层、半分解层持水量与浸水时间进行回归分析,得出该时间段内枯落物持水量与浸水时间之间存在关系为(表5):

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

式中: Q 为枯落物持水量 (t/hm^2); t 为浸水时间 (h); a 为方程系数; b 为方程常数项。

从关系式可以看出,二者之间存在明显的对数函数关系,相关系数 R^2 均在 0.95 以上。

3.2.4 枯落物的吸水速率 由图 2 可知,不同密度各分解层枯落物的吸水速率表现出一定的规律性。无论是未分解层还是半分解层,均在前 0.25 h 内吸

水速率最大,之后急剧下降,4 h 左右下降速度明显减缓,12 h 后吸水基本停止,至 24 h 时,吸水速率接近于 0,表明枯落物已达到持水饱和状态。出现这一现象的原因主要是枯落物从烘干状态浸入水中之后,由于其表面的水势差较大,会迅速从周围环境中吸水,导致吸水速率较高;随浸水时间延长,枯落物内外水势差减小,故吸水速率减慢。

表 5 不同密度刺槐林枯落物持水量、吸水速率与浸水时间的关系

枯落物层	样地编号	持水量与浸水时间		吸水速率与浸水时间	
		关系式	R^2	关系式	R^2
未分解层	I	$Q=0.4550\ln t+1.4820$	0.9892	$V=1.4012t^{-0.743}$	0.9982
	II	$Q=0.6121\ln t+4.8979$	0.9814	$V=4.8466t^{-0.886}$	0.9997
	III	$Q=0.7647\ln t+5.4158$	0.9793	$V=5.3433t^{-0.872}$	0.9995
	IV	$Q=0.5962\ln t+7.7509$	0.9865	$V=7.7199t^{-0.928}$	0.9999
	V	$Q=0.7530\ln t+6.9657$	0.9541	$V=6.8834t^{-0.897}$	0.9990
	VI	$Q=0.3235\ln t+3.1198$	0.9642	$V=3.0897t^{-0.902}$	0.9993
半分解层	I	$Q=0.3648\ln t+1.6051$	0.9614	$V=1.5327t^{-0.794}$	0.9944
	II	$Q=0.5243\ln t+6.9091$	0.9508	$V=6.8698t^{-0.927}$	0.9996
	III	$Q=1.0552\ln t+12.5720$	0.9724	$V=12.5180t^{-0.922}$	0.9998
	IV	$Q=1.0814\ln t+16.8300$	0.9634	$V=16.7620t^{-0.938}$	0.9997
	V	$Q=0.7379\ln t+10.3500$	0.9795	$V=10.3040t^{-0.932}$	0.9998
	VI	$Q=0.7810\ln t+5.3988$	0.9684	$V=5.2942t^{-0.865}$	0.9984

由于枯落物组成及干燥度等原因,使得不同密度林分枯落物初期吸水速率相差较大,样地 IV 初期吸水速率最大,但随着浸水时间的延长,枯落物的持水量接近其最大持水量,各林分枯落物吸水趋于饱和,枯落物的吸水速率趋向一致。

从图 2 还可看出,不同密度枯落物半分解层吸水速率均高于未分解层,且随浸水时间增加,半分解层吸水速率下降的速度要低于未分解层,即半分解层能

够维持更长时间的相对较高的吸水速率,吸水能力更强,这与持水量的分析结果相符。

对 6 种密度不同层次的枯落物吸水速率与浸水时间进行拟合,发现二者间的关系符合幂函数模型(表 5):

$$V=kt^n, R^2 > 0.99$$

式中: V 为枯落物吸水速率 ($t/(hm^2 \cdot h)$); t 为浸水时间 (h); k 为方程系数; n 为指数。

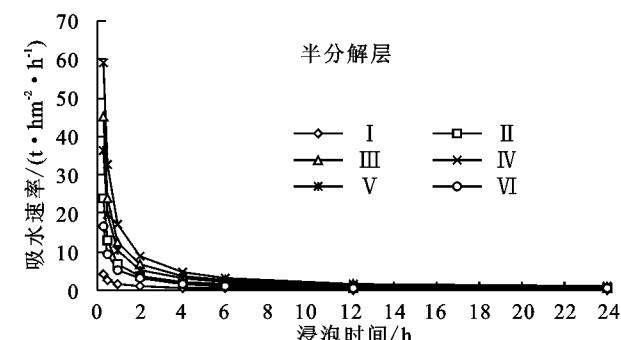


图 2 枯落物不同层次吸水速率与浸泡时间的关系

4 结论

(1) 不同密度刺槐林枯落物厚度与蓄积量表现出一定程度的差异性,但均在一定范围内随密度升高而增大,枯落物总厚度为 28.67~54.33 mm,总蓄积量为 2.98~10.65 t/hm²,其排序为:1 575 株/hm²>1 825 株/hm²>1 200 株/hm²>900 株/hm²>2 350 株/hm²>475 株/hm²,半分解层蓄积量均大于未分解层。

(2) 6 种密度刺槐林枯落物最大持水量为 11.16~37.01 t/hm²,有效拦蓄量变化范围为 7.22~23.64 t/hm²,二者均随林分密度增加呈先增大后减小的变化趋势,部分林分间有显著差异;密度为 1 575 株/hm² 的林分枯落物持水能力与拦蓄能力最强,分别为 37.01 t/hm² 和 23.64 t/hm²;半分解层持水量与拦蓄量普遍高于未分解层;最大持水率变化规律不明显。

(3)各林分枯落物持水量与浸水时间呈明显对数关系: $Q = a \ln t + b$, $R^2 > 0.95$; 枯落物吸水速率与浸水时间呈明显幂函数关系: $V = kt^n$, $R^2 > 0.99$ 。在开始浸泡的 2 h 内, 枯落物持水量迅速上升, 吸水速率最大, 之后随浸泡时间延长, 持水量增加速度减慢, 10 h 以后变化趋于平缓, 24 h 时达到饱和。枯落物层可以在短时间内快速持水有助于森林水文调节功能的发挥。

综上所述, 适宜的林分密度对于提高刺槐林枯落物层水文生态功能具有重要作用, 林分过密或者过疏都会影响其功能的发挥。造林密度为 1 200~1 800 株/ hm^2 的中密度林分, 枯落物持水性能及拦蓄能力表现较好, 水文生态功能较强, 建议今后刺槐林营建中向此范围调控。对于密度过高或过低的林分, 应及时进行间伐或补植, 注重枯落物保护, 以提高现有林分的稳定性与水土保持功能。

参考文献:

- [1] 孙浩, 杨民益, 余杨春, 等. 宁夏六盘山几种典型水源涵养林林分结构与水文功能的关系[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(1): 10-18.
- [2] 赵磊. 江西大岗山不同密度杉木林水源涵养功能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [3] 石媛, 鲁绍伟. 河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 92-97.
- [4] 贺志龙, 张芸香, 郭跃东. 不同密度华北落叶松林天然林土壤养分特征研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 43-48.
- [5] 邹扬, 贺康宁, 赵畅. 高寒区青海云杉人工林密度与林下植物多样性的关系[J]. 西北植物学报, 2013, 33(12): 2543-2549.
- [6] 王谦, 孙保平. 陕西榆林樟子松人工林土壤及枯落物水
- [7] Wang C, Zhao C Y, Xu Z L, et al. Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine forest catchment [J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(2): 207-219.
- [8] 李民义, 张建军, 郭宝妮. 晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1083-1090.
- [9] 鲁绍伟, 陈波. 北京山地不同密度侧柏人工林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 224-229.
- [10] 吴迪, 辛学兵, 裴顺祥, 等. 北京九龙山 8 种林分的枯落物及土壤水源涵养功能[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(3): 78.
- [11] 刘芝芹, 黄新会, 涂璟. 云南高原不同林分类型枯落物储量及持水特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 919-924.
- [12] 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研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 148-152.
- [13] 吴强, 楚聪颖, 张鹏, 等. 漾河上游 7 种典型林分类型水土保持功能[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 40-44.
- [14] 张栓堂, 石丽丽. 冀北山地人工油松林水文效应研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 117-122.
- [15] 陈莉莉, 王得祥. 不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 141-149.
- [16] 胡晓聪, 黄乾亮. 西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 55-63.
- [17] 刘宇, 郭建斌, 王彦辉. 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.
- [18] 白英辰, 朱江. 密度调控对华北落叶松人工林枯落物水文特征的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 128-133.

(上接第 114 页)

- [24] 张学科. 日光温室不同水肥措施下水氮迁移特性[J]. 西北农业学报, 2016, 25(12): 1884-1889.
- [25] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分, 酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 906-918.
- [26] Diego A, Laura S M, Lourdes G T. Management of irrigation frequency and nitrogen fertilization to mitigate GHG and NO emissions from drip-fertigated crops[J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 880-888.
- [27] 倪永静, 贺群岭, 李金沛, 等. 不同灌水次数与氮肥运筹对‘豫教 5 号’叶面积指数及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 35-42.
- [28] 赵雪飞, 王丽金, 李瑞奇. 不同灌水次数和施氮量对冬小麦群体动态和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(6): 1004-1009.
- [29] Sharma S P, Leskovar D I, Crosby K M, et al. Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136(2): 75-85.
- [30] 刘芬, 王小英, 赵业婷, 等. 渭北旱塬土壤养分时空变异与养分平衡研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 110-119.
- [31] 孔德杰, 张源沛, 郑国保, 等. 不同灌水次数对日光温室辣椒土壤水分动态变化规律的影响[J]. 节水灌溉, 2011(6): 14-19.