

大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应

涂志华¹, 范志平^{1,2}, 孙学凯², 弓文艳³, 张雪琪³,

郑学良³, 王琼¹, 王善祥¹, 秦依婷¹

(1. 辽宁石油化工大学生态环境研究院, 辽宁 抚顺 113001;

2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 3. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 为了研究大伙房水库流域森林生态系统枯落物层和土壤层水文效应, 以流域内3种不同植被类型为研究对象, 采用浸泡法、环刀法对其枯落物层和土壤层水文功能进行定量研究。结果表明: (1) 3种植被类型枯落物蓄积量为 23.20~39.11 t/hm², 表现为刺槐天然次生林>油松人工林>落叶松人工林, 且阔叶林枯落物半分解层蓄积量大于未分解层, 而针叶林则相反。(2) 枯落物层最大持水量为 50.24~109.19 t/hm², 有效拦蓄量为 41.70~90.71 t/hm², 均表现为刺槐天然次生林>油松人工林>落叶松人工林, 刺槐天然次生林枯落物层持水功能较好。(3) 枯落物未分解层、半分解层分别在浸水 10, 8 h 基本达到饱和, 持水量与浸水时间呈明显对数关系 ($R^2 > 0.91$); 枯落物在浸水 1 h 内吸水速率变化最大, 4 h 左右吸水速率明显减缓, 吸水速率与浸泡时间呈明显幂函数关系 ($R^2 > 0.93$)。(4) 3种植被类型土壤容重均值变化范围为 1.10~1.25 g/cm³, 总孔隙度变化范围为 27.96%~30.19%, 土壤有效持水量变化范围为 21.11~29.39 t/hm², 不同植被类型土壤层持水能力表现为刺槐天然次生林>油松人工林>落叶松人工林, 土壤入渗速率与入渗时间呈明显幂函数关系 ($R^2 > 0.90$)。综合3种植被类型枯落物层及土壤层水文功能表明刺槐天然次生林的水源涵养功能较强, 建议在该流域加强天然次生林的保护和恢复。

关键词: 大伙房水库流域; 枯落物层; 土壤层; 水文效应

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0127-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.01.021

Hydrological Effects of Litters Layer and Soil Layer in Different Vegetation Types in Dahuofang Watershed

TU Zhihua¹, FAN Zhiping^{1,2}, SUN Xuekai², GONG Wenyan³,

ZHANG Xueqi³, ZHENG Xueliang³, WANG Qiong¹, WANG Shanxiang¹, QIN Yiting¹

(1. Institute of Eco-environmental Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001;

2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

3. College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: A pilot study of hydrological effects of litters layer and soil layer was carried out in three different vegetation types (*Pinus tabulaeformis* plantation, *Larix gmelinii* plantation and *Robinia pseudoacacia* natural secondary forests) in Dahuofang Watershed. The hydrological functions of litters layer and soil layer were quantitatively determined by immersion method and cutting-ring method. The results showed that: (1) The litter volume of three different vegetation types was about 23.20 ~ 39.11 t/hm², which followed the order of *R. pseudoacacia* natural secondary forests > *P. tabulaeformis* plantation > *L. gmelinii* plantation, and the volume of semi-decomposed litter was higher than that of undecomposed litter in broad-leaved forest, while the opposite trend was observed in coniferous forest. (2) The maximum water-holding capacity and modified interception amount was 50.24 ~ 109.19 t/hm² and 41.70 ~ 90.71 t/hm², respectively, both of them followed the order of *R. pseudoacacia* natural secondary forests > *P. tabulaeformis* plantation > *L. gmelinii* plantation. (3) Semi-decomposed litter could be saturated in 8 hours and undecomposed litter reached saturation in 10 hours, the water-holding capacity had logarithmic relationship with soaking time

收稿日期: 2018-08-11

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2015BAD07B030102); 辽宁省自然科学基金项目(201602473); 辽宁省教育厅重点项目(L2017LZD005); 辽宁石油化工大学引进人才科研启动基金项目(2014XJJ-014, 2016XJJ-048)

第一作者: 涂志华(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事流域生态学、水土保持研究。E-mail: fjsmtzh@126.com

通信作者: 范志平(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事流域生态与环境生态工程、水土保持与生态修复研究。E-mail: fanzhiping125@126.com

($R^2 > 0.91$), the absorption rate changed the most within the first 1 hour of soaking, and it obviously slowed down after 4 hours, and there was a power function relationship between water absorption rate and soaking time ($R^2 > 0.93$). (4) The average soil bulk density of the three vegetation types ranged from 1.10 g/cm³ to 1.25 g/cm³, total porosity was about 27.96% ~ 30.19%. The soil effective water-holding capacity was about 21.11 ~ 29.39 t/hm², which followed the order of *R. pseudoacacia* natural secondary forests > *P. tabulaeformis* plantation > *L. gmelinii* plantation. A significant power function relation between infiltration rate and infiltration fitting time was found ($R^2 > 0.90$). Considering the hydrological effects of litter layer and soil layer of three different vegetation types, the water conservation function of *R. pseudoacacia* natural secondary forests was stronger than that of the other vegetation types, which suggested that more attention should be paid to protect and restore the natural secondary forests in the Dahuofang watershed in order to improve water conservation function of forest.

Keywords: Dahuofang Watershed; litter layer; soil layer; hydrological effects

森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,在大气水分循环中起着巨大的调节作用,具有涵养水源、保持水土、净化水质、调节气候等生态服务功能^[1-4]。森林通过林冠层、枯枝落叶层及土壤层截持和贮存降水发挥其巨大的水源涵养能力^[5-7]。枯落物层作为森林水文效应的第 2 活动层,在截持降水、拦蓄地表径流、抑制土壤水分蒸发、防止土壤侵蚀及增强土壤抗冲性等方面具有重要的作用,同时,枯落物分解可改善土壤结构,提高土壤渗透性能^[8-10]。土壤系统是土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 中的一个重要子系统,作为森林水文效应的第 3 活动层,是森林水分的主要蓄存库及调节器,土壤层的持水能力直接影响着生态系统的水文调节等过程^[11-12]。因此,开展森林枯落物层和土壤层水文效应的研究是探讨森林水文过程的基础和前提^[13-14]。

大伙房水库是辽宁省沈阳市等中南部城市群约 2 300 多万人口的重要饮用水水源地,其水质健康状况尤为重要^[15]。大伙房水库流域森林生态系统是该水源地水生态安全的重要保障,伴随水生态环境健康的重视,从枯落物层及土壤层水文效应角度分析不同植被类型水源涵养功能对大伙房水库流域水源涵养生态功能保护和建设具有重要意义。目前,对大伙房水库流域水质健康、重金属污染、土壤无机 N 含量和淋溶特征等方面已开展相关研究^[16-18],而有关大伙房水库流域不同植被类型枯落物及土壤水源涵养功能的研究未见报道。因此,本研究以大伙房水库流域油松人工林、落叶松人工林和刺槐天然次生林 3 种不同植被类型为研究对象,研究不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应,旨在揭示不同植被类型枯落物层和土壤层水源涵养功能,为大伙房水库流域水源涵养林经营管理和建设提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于辽宁省大伙房水库上游社河流域内

温道林场(124°08'—124°10' E, 41°46'—41°47' N),海拔 200~500 m。气候类型属中温带大陆性季风气候,年均降水量 800~1 000 mm,年均气温 5~8 ℃。土壤类型主要是暗棕土和棕壤。流域植被包括人工林和天然次生林,形成以油松 (*Pinus tabulaeformis*)、落叶松 (*Larix gmelinii*)、红松 (*Pinus koraiensis*) 等树种的人工林,以及刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、山杨 (*Populus davidiana*)、白桦 (*Betula platyphylloides*) 等阔叶树种组成的天然次生林;林下灌木主要有紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、刺五加 (*Acanthopanax senticosus*)、忍冬 (*Lonicera japonica*) 等;林下草本主要有狭叶荨麻 (*Urtica angustifolia*)、车前草 (*Plantago depressa*)、葎草 (*Humulus scandens*)、紫花地丁 (*Viola philippica*) 等。

1.2 样地设置

于 2017 年 7 月,在大伙房水库流域内选取油松人工林、落叶松人工林和刺槐天然次生林 3 种主要植被类型为研究对象,并分别在每个植被类型内设置 3 块 20 m×20 m 试验样地(样地基本情况见表 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 枯落物蓄积量调查及持水性能测定 在每块样地内随机选取 5 个 50 cm×50 cm 的枯落物小样方,按分解程度(未分解、半分解)分层取样称其鲜质量,并测量各层厚度。将样品带回室内在 75 ℃烘干至恒重,统计各样地枯落物蓄积量。采用室内浸泡法测定枯落物持水能力。将枯落物样品浸泡浸入水中后,分别测定在 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 24 h 时枯落物样品重量变化,研究枯落物持水量、吸水速度及吸水过程。枯落物有效拦蓄量的计算公式^[12-13]为:

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

式中: W 为有效拦蓄量(t/hm²); R_m 、 R_o 分别为最大持水率(%)和平均自然含水率(%); M 为枯落物蓄积量(t/hm²)。

表 1 不同植被类型研究样地基本情况

植被类型	林龄/ a	树高/ m	平均 胸径/cm	郁闭度	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	土壤 类型	林下植被状况
油松人工林	42	22~26	26	0.7	275	18~20	西北坡	棕壤	林下植被较少,草本植物主要有马唐(<i>Digitaria sanguinalis</i>)、委陵菜(<i>Potentilla chinensis</i>)等
落叶松人工林	42	17~20	18	0.7	283	17~19	西北坡	棕壤	林下植被较少,草本植物主要有紫花地丁、车前草等
刺槐天然次生林	42	14~18	25	0.9	266	17~20	西北坡	棕壤	林下灌木树种主要有胡枝子、忍冬、悬钩子(<i>Rubus corchorifolius</i>)等灌木,林下草本植物主要有车前草、藜(<i>Chenopodium album</i>)、莓草等

1.3.2 土壤水分物理性质测定 在不同植被类型样地内随机布设 3 个样点,每样点挖土壤剖面,用 100 cm³ 环刀分别在 0—10,10—20,20—30cm 土层取原状土样。采用烘干法测定土壤含水量,环刀法测定土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度等物理性质。土壤蓄水性能计算公式^[13-14]为:

$$S=10000Ph \quad (2)$$

式中: S 为土壤持水量(t/hm²); P 为土壤孔隙度(%); h 为土层厚度(cm)。

1.3.3 土壤入渗性能测定 采用双环法测定土壤入渗性能。将自制双环(内外环直径分别为 15,25 cm,高 25 cm)同时垂直砸入土壤中 10 cm,向内、外环中注水,并使水面保持在 10 cm 高度,利用放置于内环中的标尺读取单位时间内所消耗的水量^[13]。

1.4 数据处理与统计分析

利用 SPSS 18.0 软件进行数据统计分析,采用单因素方差分析不同植被类型枯落物持水能力和土

壤持水能力的差异显著性,并利用最小显著差异法(LSD)进行多重比较分析($\alpha=0.05$),采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 枯落物蓄积量

由表 2 可知,不同植被类型枯落物层厚度差异不显著($p>0.05$),为 5.30~5.88 cm。3 种植被类型枯落物蓄积量存在显著差异($p<0.05$),刺槐天然次生林枯落物蓄积量最大,为 39.11 t/hm²;其次是油松人工林(32.81 t/hm²),落叶松人工林最小,为 23.20 t/hm²。通过分析 3 种植被类型不同分解程度枯落物层蓄积量占总蓄积量的比例可以看出,油松人工林、落叶松人工林未分解层所占比例较大,分别为 59.11%,59.50%,而刺槐天然次生林则以半分解层所占比例较大,这与阔叶林枯枝落叶分解较快,而针叶林枯枝落叶分解较慢有关。

表 2 不同植被类型枯落物蓄积量特征

植被类型	枯落物厚度/cm			总蓄积量/ (t·hm ⁻²)	未分解层		半分解层	
	总厚度	未分解层	半分解层		蓄积量/ (t·hm ⁻²)	百分比/%	蓄积量/ (t·hm ⁻²)	百分比/%
油松人工林	5.82±0.94a	3.43±0.27a	2.39±0.68b	32.81±4.39a	19.47±3.30a	59.11±2.65a	13.35±1.30b	40.89±2.65b
落叶松人工林	5.88±1.51a	3.85±0.45a	2.03±1.27b	23.20±2.58b	13.81±1.79b	59.50±3.35a	9.39±1.20c	40.50±3.35b
刺槐天然次生林	5.30±0.53a	1.97±0.28b	3.33±0.29a	39.11±5.58a	18.59±1.80a	48.32±7.78b	20.52±5.42a	51.68±7.78a

注:表中数据为平均值±标准误差;不同小写字母表示不同植被类型差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 枯落物层水文效应

2.2.1 枯落物最大持水量 由表 3 可知,大伙房水库流域油松人工林、落叶松人工林和刺槐天然次生林枯落物最大持水量为 50.24~109.19 t/hm²。刺槐天然次生林枯落物最大持水量最大,为 109.19 t/hm²,分别是油松人工林、落叶松人工林的 1.75,2.17 倍。不同植被类型

最大持水率变化范围为 212.67%~314.67%,依次为刺槐天然次生林(314.67%)>落叶松人工林(247.33%)>油松人工林(212.67%)。刺槐天然次生林枯落物最大持水率与最大持水量表现一致,而落叶松人工林、油松人工林最大持水率与最大持水量表现不同的规律,这可能与植被类型、枯落物蓄积量、枯落物分解程度等有关。

表 3 不同植被类型枯落物最大持水量

植被类型	最大持水率/%			最大持水量/(t·hm ⁻²)		
	半分解	未分解	平均	半分解	未分解	总和
油松人工林	214.33±28.04b	211.00±18.08b	212.67±8.02b	23.51±3.74b	38.85±3.52b	62.35±2.04b
落叶松人工林	257.67±8.96b	237.00±14.00b	247.33±8.10b	19.56±0.84b	30.68±1.93b	50.24±2.07b
刺槐天然次生林	322.00±3.46a	307.33±49.92a	314.67±26.24a	56.99±0.71a	52.20±9.28a	109.19±9.81a

2.2.2 枯落物有效拦蓄量 由表 4 可知,不同植被类型枯落物平均有效持水率变化范围为 155.90%~232.06%,表现为刺槐天然次生林(232.06%)>落叶松人工林(178.13%)>油松人工林(155.90%)。不同的林分枯落物层厚度及蓄积量不同,因而有效拦蓄量和拦蓄

深的变化也不尽相同,表现为刺槐天然次生林(90.71 t/hm²)>油松人工林(51.90 t/hm²)>落叶松人工林(41.70 t/hm²),相当于可分别拦蓄 9.07,5.19,4.17 mm 的降雨。综合 3 种植被类型枯落物拦蓄降雨的变化规律,可以看出刺槐天然次生林的拦蓄能力最强。

表 4 不同植被类型枯落物有效拦蓄量

植被类型	有效持水率/%			有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)			有效拦蓄深/mm
	半分解	未分解	平均	半分解	未分解	总和	
油松人工林	143.93±23.84b	167.87±15.37b	155.90±6.82b	19.21±3.18b	32.69±2.99ab	51.90±1.73b	5.19b
落叶松人工林	169.62±7.62b	186.63±11.90b	178.13±6.88b	15.93±0.72b	25.77±1.64b	41.70±1.76b	4.17b
刺槐天然次生林	229.44±2.94a	234.67±42.43a	232.06±22.30a	47.08±0.60a	43.63±7.89a	90.71±8.34a	9.07a

2.2.3 枯落物持水过程 由图 1 可知,3 种不同植被类型枯落物未分解层、半分解层持水量变化趋势基本一致:均表现为在浸水 1 h 内,持水量迅速增大,随着浸泡时间的延长,单位时间内持水量逐渐减小,直至达到饱和状态。3 种植被类型枯落物未分解层、半分解层持水量表现为刺槐天然次生林>油松人工林>落叶松人工林,且枯落物半分解层持水量显著大于未分解层($p<0.05$)。此外,3 种不同植被类型枯落物半分解层持水量在浸泡 8 h 时已基本达到饱和,而

未分解层持水量浸泡 10 h 时基本达到饱和,表明 3 种植被类型枯落物未分解层持水能力大于半分解层。对 3 种植被类型枯落物未分解层、半分解层持水量与浸水时间的关系进行拟合,得出二者之间呈对数函数关系:

$$y = a \ln t + b \quad (R^2 > 0.91)$$

式中: y 为枯落物持水量(t/hm²); t 为浸水时间(h); a 、 b 为待估参数。不同植被类型枯落物未分解层、半分解层持水量与浸水时间的关系式见表 5。

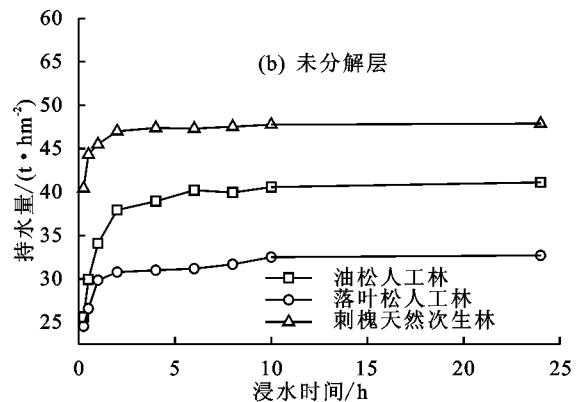
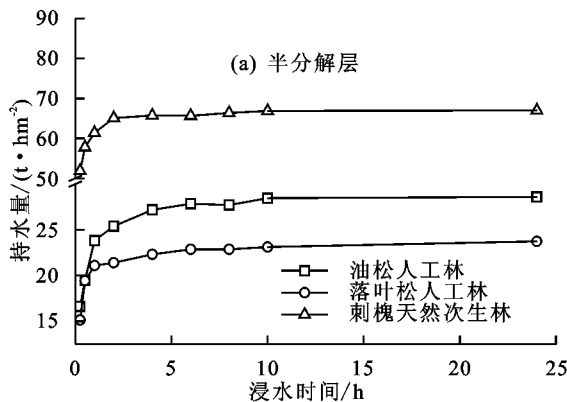


图 1 不同植被类型枯落物持水量变化过程

表 5 不同植被类型枯落物层持水量与浸泡时间关系

植被类型	枯落物层	关系式	R ²
油松人工林	半分解	$y = 5.863 \ln t + 16.669$	0.965
	未分解	$y = 7.455 \ln t + 25.885$	0.964
落叶松人工林	半分解	$y = 3.591 \ln t + 16.217$	0.941
	未分解	$y = 3.747 \ln t + 24.764$	0.957
刺槐天然次生林	半分解	$y = 6.989 \ln t + 53.146$	0.944
	未分解	$y = 3.246 \ln t + 41.511$	0.916

注: y 为枯落物持水量(t/hm²); t 为浸水时间(h)。

2.2.4 枯落物吸水速率 由图 2 可知,大伙房水库流域 3 种不同植被类型枯落物未分解层、半分解层的吸水速率与浸水时间呈“逆 J”形曲线变化规律:在浸泡初期前 1 h 内,枯落物吸水速率变化最大,之后迅速下降,在 4 h 后下降趋势明显变缓,至 24 h 逐渐趋停。3 种不同植被类型枯落物在浸水初期,其吸水速率相差甚大,尤其是刺槐天然次生林显著大于油松人工林和落叶松人工林($p<0.05$),但随着浸泡时间的

延长,吸水速率趋势趋于一致,这表明随着浸泡时间的延长,枯落物持水达到饱和状态。对 3 种植被类型枯落物未分解层、半分解层吸水速率与浸水时间的关系进行拟合,二者呈幂函数关系:

$$v = kt^n \quad (R^2 > 0.93)$$

式中: v 为枯落物层吸水速率(t/(hm²·h)); t 为浸水时间(h); k 为系数; n 为指数。不同植被类型枯落物未分解层、半分解层吸水速率与浸水时间的关系式见表 6。

2.3 土壤层水文效应

2.3.1 土壤物理性质 土壤容重和孔隙度作为反映土壤物理性质的重要参数,二者直接影响土壤通气透水性能,是决定土壤蓄水功能的重要因素^[13]。由表 7 可知,3 种植被类型土壤容重差异不显著($p>0.05$),具体表现为落叶松人工林最大,为 1.25 g/cm³,次之为油松人工林(1.11 g/cm³),刺槐天然次生林最小为 1.10 g/cm³;从 0—30 cm 土壤垂直剖面来看,土壤容重随土

层深度的增大而增大的变化趋势。土壤总孔隙度反映土壤的疏松程度,其变化趋势为:刺槐天然次生林(30.19%)>落叶松人工林(28.83%)>油松人工林(27.96%);而非毛管孔隙度与土壤持水能力大小密切相关,其变化趋势表现为:刺槐天然次生林(2.94%)>油松

人工林(2.88%)>落叶松人工林(2.11%)。在 0—30 cm 土壤垂直剖面来看,土壤总孔隙度、非毛管孔隙度伴随土层的增大而减少;在毛管孔隙度方面,油松人工林和落叶松人工林伴随土层的增大而减少,而刺槐天然次生林最大值则出现在 10—20 cm 土层。

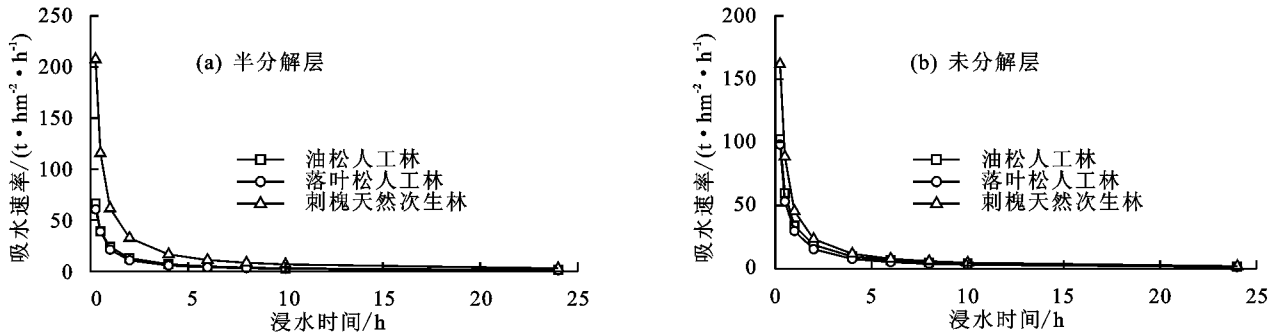


图 2 不同植被类型枯落物吸水速率变化过程

表 6 不同植被类型枯落物层吸水速率与浸泡时间关系

植被类型	枯落物层	关系式	R ²
油松人工林	半分解	$v=109.340t^{-1.778}$	0.932
	未分解	$v=168.770t^{-1.815}$	0.936
落叶松人工林	半分解	$v=104.510t^{-1.854}$	0.934
	未分解	$v=159.890t^{-1.908}$	0.944
刺槐天然次生林	半分解	$v=342.370t^{-1.922}$	0.944
	未分解	$v=266.900t^{-1.966}$	0.947

注: v 为枯落物层吸水速率($t/(hm^2 \cdot h)$); t 为浸水时间(h)。

2.3.2 土壤持水能力 毛管孔隙与非毛管孔隙的水分贮蓄量之和构成饱和持水量,是土壤涵蓄潜力的最大值,体现土壤水分调蓄能力的大小^[12-13];非毛管孔隙的水分贮蓄量大小反映了土壤有效持水量的多少,

其值越大,说明持水能力越强。大伙房水库流域不同植被类型土壤物理性质存在差异,因而土壤饱和持水量和有效持水量的大小也不尽相同。由表 7 可知,刺槐天然次生林土壤饱和持水量最大,为 301.92 t/hm^2 ,落叶松人工林(288.31 t/hm^2)次之,油松人工林(279.56 t/hm^2)最小,同一植被不同土层土壤饱和持水量随土层的增大而减少。土壤有效持水量表现为刺槐天然次生林(29.39 t/hm^2)>油松人工林(28.72 t/hm^2)>落叶松人工林(21.11 t/hm^2)。综合饱和持水量和有效持水量可以看出,刺槐天然次生林具有较强的土壤持水能力。

表 7 不同植被类型土壤水分物理性状及持水量特征

植被类型	土层深度/cm	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	饱和持水量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	有效持水量/ ($t \cdot hm^{-2}$)
油松人工林	0—10	1.07±0.11a	26.29±2.45a	3.36±0.68a	29.64±2.78a	296.44±27.81a	33.56±6.81a
	10—20	1.16±0.03a	25.48±0.66a	3.34±0.73a	28.82±1.35a	288.18±13.51a	33.36±7.27a
	20—30	1.11±0.04a	23.48±2.67a	1.93±0.77b	25.41±1.91a	254.06±19.06a	19.25±7.73b
	平均	1.11±0.05a	25.08±1.45a	2.88±0.82a	27.96±2.24a	279.56±22.47a	28.72±8.20a
落叶松人工林	0—10	1.10±0.04a	30.69±2.11a	2.30±0.73a	32.99±1.78a	329.86±17.82a	22.97±7.30a
	10—20	1.27±0.15a	26.62±4.78a	2.10±1.16a	28.72±5.09a	287.16±50.90a	20.99±11.6a
	20—30	1.38±0.14a	22.85±5.05ab	1.94±0.72a	24.79±5.24a	247.9±52.38a	19.36±7.19a
	平均	1.25±0.14a	26.72±3.92a	2.11±0.18a	28.83±4.10a	288.31±40.99a	21.11±1.81a
刺槐天然次生林	0—10	1.02±0.08a	27.57±2.11a	3.49±0.41a	31.06±1.94a	310.62±19.39a	34.94±4.06a
	10—20	1.14±0.06a	28.13±2.06a	2.82±1.74a	30.95±1.73a	309.50±17.27a	28.24±17.4a
	20—30	1.15±0.06a	26.06±2.56a	2.50±1.47a	28.56±1.85a	285.65±18.47a	25.00±14.67a
	平均	1.10±0.07a	27.25±1.07a	2.94±0.51a	30.19±1.41a	301.92±14.10a	29.39±5.07a

注:不同小写字母表示同一植被类型不同土壤层差异显著($p<0.05$)。

2.3.3 土壤入渗 土壤入渗能力直接影响着地表径流转化为壤中流、地下径流,是反映森林涵养水源的重要指标之一^[8]。土壤渗透性越好,地表径流量和土壤侵蚀量越小,因此,土壤的渗透能力是影响土壤侵蚀的重要因素之一,是土壤水文效应评价的重要指标^[12-13]。由表 8 可知,3种植被类型土壤层初渗速率

相差较大,刺槐天然次生林的初渗速率最大为 26.03 mm/min,最小为油松人工林(15.74 mm/min),二者相差 1.65 倍。随着时间的推移,入渗速率逐渐减慢,直至趋于稳渗,不同植被类型的稳渗速率为 1.03~1.41 mm/min,油松人工林为 1.18 mm/min,落叶松人工林为 1.03 mm/min,刺槐天然次生林为 1.41

mm/min。在入渗过程中,油松人工林在 36 min 左右达到稳渗,落叶松人工林在 28 min 左右达到稳渗,刺槐天然次生林在 34 min 左右达到稳渗。通过对不同植被类型土壤入渗时间和入渗速率进行拟合(图

3),发现二者之间存在较好的幂函数关系:

$$f=at^b(R^2>0.90)$$

式中: f 为土壤入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 为系数; b 为指数。

表 8 不同植被类型土壤入渗模型

植被类型	初渗速率/ (mm·min ⁻¹)	稳渗速率/ (mm·min ⁻¹)	稳渗 时间/min	回归 方程	R ²
油松人工林	15.74	1.18	36	$f=14.959t^{-0.753}$	0.954
落叶松人工林	18.13	1.03	28	$f=16.995t^{-0.827}$	0.944
刺槐天然次生林	26.03	1.41	34	$f=16.645t^{-0.737}$	0.907

注: f 为土壤入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min)。

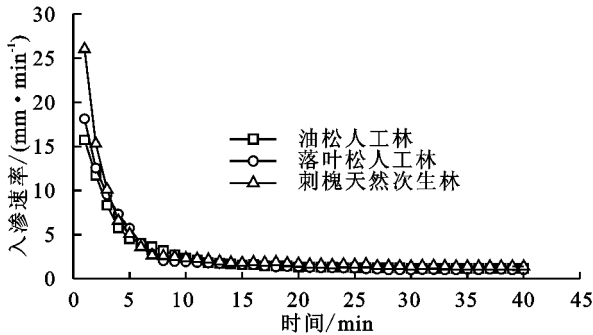


图 3 不同植被类型土壤入渗特征

3 讨论

3.1 不同植被类型枯落物层的水文效应

枯落物蓄积量与枯落物产量、植被类型、林木生长发育、气候等因素有关^[13-14],本研究表明刺槐天然次生林枯落物蓄积量最大,这与侯贵荣等^[12]研究表明刺槐林枯落物蓄积量大于油松林及油松刺槐混交林的结果一致。总体来说,针叶林未分解层枯落物蓄积量大于半分解层,而阔叶林则相反,这主要是针叶林枯落物中存在较多难分解的单宁、酚类物质、萜类物质有关^[13-14]。刺槐天然次生林最大持水量最大,这是因为刺槐天然次生林枯落物分解程度较高、半分解层枯落物蓄积量大,故其持水能力较强;而油松人工林和落叶松人工林枯落物分解程度较低、未分解层与半分解层的枯落物蓄积量小,所以最大持水量较小,这与胡淑萍等^[19]研究阔叶树枯落物的持水能力普遍高于针叶树的结果一致。有效拦蓄量反映枯枝落叶层对降雨的拦蓄能力,受枯落物蓄积量、自然含水量和降雨特征等影响^[13,19],本研究表明刺槐天然次生林枯落物拦蓄能力最大,可拦蓄 9.07 mm 的降雨,这与刺槐天然次生林蓄积量较大有关。通过拟合分析发现,枯落物持水量与浸水时间的关系符合对数函数关系: $y=a\ln t+b(R^2>0.91)$,枯落物吸水速率与浸水时间的关系符合幂函数关系: $v=kt^n(R^2>0.93)$,这与胡晓聪等^[7]和侯贵荣等^[12]的研究结果一致。枯落物室内浸水模拟试验一定程度上反映了枯落物的拦蓄能力,但还需结合野外降雨事件进一步研

究枯落物层拦蓄降雨的能力。

3.2 不同植被类型土壤层的水文效应

土壤是森林生态系统涵养水源的主体,土壤持水能力的大小直接影响地表径流、土壤潜流和地下水补给等^[13,19]。土壤容重和孔隙度是土壤水文物理特性的重要指标,直接影响着土壤通气透水性能,是决定林下土壤水源涵养功能的重要因素^[14]。研究区 3 种植被类型的土壤层水文物理性质存在差异,这与不同植被类型的枯枝落叶组成、分解程度及根系的生长状况有很大关系^[7-8]。刺槐天然次生林土壤容重最小,而土壤总孔隙度和非毛管孔隙度最大,即其通气透水性良好,这可能与刺槐根系发达、林下枯落物分解程度高有关;而落叶松人工林、油松人工林土壤容重高,孔隙度小,即土壤紧实程度高、通气透水性差,这可能与林内开展修枝整枝、林地清理及林下经济活动等人类的干扰有关。研究区 3 种植被类型土壤容重随着土壤层次的增大而增大,土壤总孔隙度、非毛管孔隙度伴随土层的增大而减少,这与卢振启等^[8]研究结果一致。3 种植被类型土壤持水量存在差异,30 cm 土层厚度的饱和持水量和有效持水量最大的为刺槐天然次生林,其涵养水源的能力较大,这主要取决于刺槐天然次生林土壤的孔隙特性,其非毛管孔隙大于油松人工林和落叶松人工林,因而能快速吸纳降雨并及时下渗,有利于涵养水源^[12,19]。土壤渗透性表征土壤对降雨和形成的地表径流的就地入渗能力,是土壤水文调节功能和水源涵养的重要指标^[7]。本研究表明 3 种植被类型中,刺槐天然次生林的初渗速率最大、油松人工林最小,这主要是刺槐天然次生林土壤层的非毛管孔隙数量较多,有利于吸收降雨并快速下渗,土壤的渗透能力较强,而油松人工林的非毛管孔隙较少,其渗透性较差^[8,12]。对 3 种植被类型土壤入渗速率与入渗时间拟合发现,二者呈幂函数关系,这与赵阳等^[13]和鲁绍伟等^[14]的研究结果一致。

在本研究中,综合枯落物拦蓄能力及土壤持水能力可以看出,不同植被类型的水源涵养能力存在一定

的差异,刺槐天然次生林的水源涵养功能较强。刺槐天然次生林林下灌草植被较多,人为干扰较少;而油松人工林、落叶松人工林林下植被较少,同时进行修枝整枝、林地清理及林下经济活动等人为干扰频繁,影响了林地的水源涵养功能。因此,从不同植被类型涵养水源、蓄水保土的角度出发,建议在该流域范围内应该减少人为干扰,加强天然次生林的保护和恢复,以增强水源涵养功能。

4 结论

(1)研究区3种植被类型枯落物层厚度在5.30~5.88 cm,枯落物蓄积量变化范围为23.20~39.11 t/hm²,依次为刺槐天然次生林>油松人工林>落叶松人工林。油松人工林、落叶松人工林未分解层占总蓄积量的59.11%,59.50%,而刺槐次生林半分解层占总蓄积量的51.68%。

(2)3种植被类型枯落物最大持水量变化范围为50.24~109.19 t/hm²,表现为刺槐天然次生林>油松人工林>落叶松人工林;有效拦蓄量在41.70~90.71 t/hm²,刺槐天然次生林拦蓄量最大,相当于拦蓄9.07 mm的降雨,是油松人工林、落叶松人工林的1.75,2.18倍。

(3)不同植被类型枯落物未分解层、半分解层持水量在浸水时间1 h内迅速增大,未分解层、半分解层持水量分别在浸水10,8 h时基本达到饱和。枯落物持水量与浸水时间呈对数关系, R^2 在0.91以上;枯落物在浸水1 h内吸水速率变化最大,4 h左右吸水速率明显减缓,枯落物吸水速率与浸水时间呈幂函数关系, R^2 在0.93以上。

(4)不同植被类型土壤容重均值变化范围为1.10~1.25 g/cm³,总孔隙度变化范围为27.96%~30.19%,土壤有效持水量变化范围为21.11~29.39 t/hm²,土壤层持水能力表现为刺槐天然次生林>油松人工林>落叶松人工林。

(5)研究区3种植被类型土壤层初渗速率为15.74~26.03 mm/min,刺槐天然次生林的初渗速率最大,是油松人工林、落叶松人工林的1.65,1.43倍;不同植被类型土壤稳渗速率为1.03~1.41 mm/min,对土壤入渗时间和入渗速率进行拟合,二者呈幂函数关系, R^2 在0.90以上。

参考文献:

[1] 余新晓,鲁绍伟,靳芳,等. 中国森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报,2005,25(8):2096-2102.

[2] Edwards D P, Tobias J A, Sheil D, et al. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(9): 511-520.

[3] Mori A S, Lertzman K P, Gustafsson L. Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: A research agenda for applied forest ecology [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54: 12-27.

[4] 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.

[5] Breure A M, Deyn G D, Dominati E, et al. Ecosystem services: A useful concept for soil policy making! [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(5): 578-585.

[6] Zhang M, Liu N, Harper R, et al. A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546(2017): 44-59.

[7] 胡晓聪,黄乾亮,金亮. 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.

[8] 卢振启,黄秋娟,杨新兵. 河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究[J]. 水土保持学报,2014,28(1):112-116.

[9] 贾剑波,刘文娜,余新晓,等. 半城子流域3种林地枯落物的持水能力[J]. 中国水土保持科学,2015,13(6):26-32.

[10] Dunkerley D. Percolation through leaf litter: What happens during rainfall events of varying intensity? [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 737-746.

[11] 余新晓. 森林植被—土壤—大气连续体水分传输过程与机制[M]. 北京:科学出版社,2016.

[12] 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):358-371.

[13] 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.

[14] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等. 北京山地不同海拔人工油松林枯落物及其土壤水文效应[J]. 水土保持研究,2013,20(6):54-58.

[15] 王琼,李法云,范志平,等. 辽宁省大伙房水库及入库河流水质空间特征与河库水质关系[J]. 湖泊科学,2016,28(4):775-784.

[16] 史玉强,刘建东,金永民,等. 辽宁大伙房水库水质健康风险评估[J]. 中国环境监测,2013,29(3):60-64.

[17] 高佳,苏芳莉,孟繁斌. 大伙房水库流域重金属Cu分布特征规律[J]. 水土保持学报,2015,29(1):235-238,262.

[18] 胡亚林,刘杰,范志平,等. 大伙房水库流域水源涵养林植被类型对土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N淋溶的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(8):2103-2110.

[19] 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.