

黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能

侯贵荣¹, 毕华兴^{1,2,3,4}, 魏曦¹, 周巧稚¹, 孔凌霄¹, 王杰帅¹, 贾剑波⁵

(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. 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004)

摘要: 为了研究黄土残塬沟壑区典型林地枯落物和土壤水文特性, 并对黄土残塬沟壑区造林树种的选择及功能导向型林分改造提供依据, 于 2017 年在山西省吉县蔡家川流域选择刺槐林、油松林、刺槐×油松混交林为研究对象, 分别采用浸泡法、环刀法对林地枯落物层和土壤层持水性能进行定量化研究, 探究其水源涵养功能。结果表明: (1) 3 种林地枯落物总储量在 105.49~148.38 t/hm² 之间变动, 且半分解层储量大于未分解层储量; 油松×刺槐混交林地枯落物总厚度最大(3.8 cm), 刺槐林次之(3.6 cm), 油松林最小(3.4 cm); (2) 枯落物最大持水量(率)均为油松×刺槐混交林最大, 刺槐纯林次之, 油松纯林最小, 分别为 117.99 t/hm² (387.12%), 106.19 t/hm² (324.31%), 82.86 t/hm² (305.76%); (3) 枯落物有效拦蓄量与持水量(率)表现一致, 均为阔叶林优于针叶林, 有效拦蓄量为 83.66~195.72 t/hm², 有效拦蓄率为 121.75%~292.21%; 枯落物持水量、吸水速率与浸水时间分别符合对数函数和指数函数; (4) 3 种林地土壤容重均值在 0.99~1.01 g/cm³ 浮动, 总孔隙度为 49.39%~50.09%, 土壤有效持水量为 32.99~81.73 t/hm², 林地土壤入渗速率与入渗时间呈幂函数关系。综合 3 种林地枯落物层和土壤层的涵养水源能力表现为油松×刺槐混交林较高, 油松纯林较差。建议在现有林分改造中, 宜将刺槐纯林和油松纯林逐渐向混交林模式改进。

关键词: 枯落物; 最大持水量; 有效拦蓄量; 水源涵养功能; 黄土残塬沟壑区

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0357-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.052

Water Conservation Function of Litters and Soil in Three Kinds of Woodlands in Gully Region of Loess Plateau

HOU Guirong¹, BI Huaxing^{1,2,3,4}, WEI Xi¹, ZHOU Qiaozhi¹,

KONG Lingxiao¹, WANG Jieshuai¹, JIA Jianbo⁵

(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 Soil and Water Conservation, State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 5. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

Abstract: In order to investigate the water conservation function of litter and soil in typical forest lands and provide the basis for tree species selection and stand improvement by functional orientation in Gully region of Loess Plateau, the *Robinia pseudoacacia* L., *Pinus tabulaeformis*, and mingled forest were chosen as subjects in this article at Caijiachuan watershed in Ji County of Shanxi province in 2017. The water conservation function was studied by quantitative research with Immersion method and cutting-ring method applied to litter and soil in typical forest lands. The results showed: (1) The total litter storage capacity of the three kinds of forest lands ranged from 105.49 to 148.38 t/hm², and the storage capacity of semi-decomposed litter was higher than that of undecomposed litter. The total litter thickness of mingle forest composed with *R. pseudoacacia* L. and *P. tabulaeformis* was the highest as 3.8 cm, the second was *R. pseudoacacia* L. forest as 3.6 cm, while the *Pinus tabulaeformis* was the lowest, 3.4 cm. (2) By analyzing the rules of maximum

收稿日期: 2017-10-23

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 2011 协同创新中心(市级)(PXM2017_014207_000024)

第一作者: 侯贵荣(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事森林水文、植被恢复研究。E-mail: hgralex@163.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

water-holding capacity and maximum water-holding rate, the mangle forest was the highest and the *R. pseudoacacia* L. and *P. tabulaeformis* was the second and the third respectively, the values were 117.99 t/hm² and 387.12%, 106.19 t/hm² and 324.31%, 82.86 t/hm² and 305.76%, respectively. (3) The effect interception amount and the effect interception rate of litter in broad-leaf forest was more than that in coniferous forest. The effect interception amount ranged from 83.66 to 195.72 t/hm², and the effect interception rate ranged from 121.75% to 292.21%. The relationship between the water-holding capacity and the immersion time fitted Logarithmic Function, and the relationship between the water-absorption rate and the immersion time fitted Exponential Function. (4) The average of soil bulk density of three kinds of forest land ranged from 0.99 to 1.01 g/cm³, and the total soil porosity varied from 49.39%~50.09%, and the soil water-holding capacity varied from 32.99~81.73 t/hm². By analyzing soil infiltration rate and infiltration time, we found that there is a power function relation between them. Considering the water-holding abilities of the litter and soil of three kinds of forest lands, the water conservation abilities of the mangle forest was the highest, while that of the *P. tabulaeformis* was the lowest. Therefore, the existing *R. pseudoacacia* L. and *P. tabulaeformis* forest should aim at mangle forest in the stand improvement.

Keywords: litter; maximum water holding capacity; effective interception amount; water conservation function; Gully region of Loess Plateau

森林生态系统垂直结构可分为林冠层、枯枝落叶层、土壤层 3 个层次^[1-2]。大气降水经森林垂直结构的林冠层重新分配后,一部分降水被林冠截留,一部分穿过林冠层被枯落物截留渗入土壤,完成大气降水的循环过程^[3]。枯枝落叶层作为森林植物群落水文效应的第二活动层,对改善土壤性质、增加降水入渗、保持水土、涵养水源有巨大的促进作用。枯落物分解可增加土壤有机质,为土壤生物提供养分与能量,促进生态系统物质循环,维持养分储存、固碳等生态功能^[4]。研究表明,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^[5]。

土壤层作为森林水文效应的第三活动层,是森林水分贮存的主要场所,是林木赖以生长的基础,径流过程也发生在土壤表面^[6],是 SPAC(土壤—植被—大气连续体)系统的主要蓄存库、调节器,直接影响着生态系统的水文调节等过程^[7]。此外,土壤还是复杂的自然综合体,在生态系统的物质循环和能量流动方面起着重要作用^[8]。

目前,国内外对枯落物的动态分解、养分归还、持水特性、截留降雨等特性已经取得较为成熟的研究成果^[9-10],对林地土壤持水能力、入渗能力的水文效应的研究也取得较为系统的理论共识^[11]。但不同树种的形态结构特征及其群落结构的存在差异,不同林地的涵养水源能力差异也很大^[12]。自 1992 年来,晋西黄土残塬沟壑区实施退耕还林工程,经过 25 年的生态恢复,已经形成较稳定的森林生态系统,本文选择该区刺槐和油松 2 种主要造林树种为研究对象,分别探究油松纯林、刺槐纯林以及油松×刺槐混交 3 种植模式下林地的枯落物层和土壤层的水源涵养功能,

为黄土残塬沟壑区生态恢复和重建的树种选择和种植模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于晋西黄土残塬沟壑区吕梁山南端山西吉县蔡家川流域(110°39'45"—110°47'45"E, 36°14'27"—36°18'23"N),流域面积 40.1 km²,海拔 904~1 592 m。降水集中在 6—8 月,约占全年降水量的 70%,流域多年平均降水量 579 mm,多年平均水面蒸发量 1 729 mm,年均气温 10 ℃,具有典型黄土高原气候特征,属于暖温带、半湿润地区,褐土、半旱生落叶阔叶林与森林草原地带。流域土壤为褐土,黄土母质。营造防护林的主要树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)等乔木,混生或伴生有天然林山杨(*Populus davidiana* Dode.);灌木主要有黄刺玫(*Rosa xanthine* Lindl.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* D.)、荆条(*Vitex negundo* Linn. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata* Linn.)、丁香(*Syzygium aromaticum* (L.) Merr. Et Perry)等,草本以白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)、冰草(*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.)等为主的旱生植物群落。

研究区主要人工造林树种为油松和刺槐,其树种搭配形式主要为油松纯林、刺槐纯林及油松×刺槐混交林,本研究选择油松纯林、刺槐纯林和油松×刺槐混交林各 3 块作为研究样地,样地林分基本情况见表 1。

表 1 样地林分基本概况

林分类型	样地编号	海拔/ m	坡度/ (°)	立地条件	平均 树高/m	平均 胸径/cm	平均 林龄/a	密度/ (株·hm ⁻²)	叶面积 指数(LAI)
油松	5	1130	35	阴坡	6.4	12.5	25	1200	2.00
	7	1140	28	阳坡	6.6	12.4	25	1275	2.30
	8	1150	26	半阳坡	8.4	13.9	25	1250	1.62
	15	1220	34	半阳坡	7.6	9.5	22	1825	1.78
刺槐	16	1190	31	半阳坡	8.0	8.8	23	1825	2.35
	18	1120	22	半阴坡	9.9	11.2	23	1825	1.56
	9	1110	18	半阳坡	7.4	10.0	22	1600	1.85
油松×刺槐	10	1130	20	阴坡	8.3	9.8	22	3075	1.21
	11	1125	22	半阴坡	8.0	9.0	22	1625	2.62

1.2 研究方法

1.2.1 枯落物储量调查以及持水量测定 在每块样地内随机选取 3 个 30 cm×30 cm 的小样方分别测量枯落物未分解、半分解厚度,再分层放入档案袋带回室内进行称量作为风干前的鲜重。将收集到的 18 个样品放入烘箱调至 85 ℃连续 12 h 后至恒重,作为烘干后的重量并记录。采用连续浸泡法测定枯落物持水能力。将 18 个档案袋内样品转移至尼龙网袋,扎紧口部,全部浸泡在装水的盆中,分别在 0.25,0.5,1,2,4,8,12,24 h 时将网袋取出控水至不再滴水后称重,作为浸泡后的重量并记录。枯落物最大持水量(率)和有效拦蓄量(率)的计算公式为:

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

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

$$W_1=M_2-M_0 \tag{3}$$

$$R_0=\frac{W_1}{M_0}\times 100\% \tag{4}$$

$$W_m=(R_m-R_0)\times M \tag{5}$$

$$W=(0.85R_m-R_0)\times M \tag{6}$$

式中:W₀为枯落物最大持水量(g);M₁为浸泡 24 h 后的枯落物质量(g);M₀为风干后枯落物的质量(g);R_m为最大持水率(%);W₁为样品自然含水量(g);R₀为自然含水率(%);W_m为最大拦蓄量(t/hm²);W 为有效拦蓄量(t/hm²);M₂为样品鲜重(g);M 为枯落物蓄积量(t/hm²);0.85 为有效拦蓄系数。

1.2.2 土壤水分物理性质测定 采用环刀法测定土壤物理性质,分别按 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土层取样。土壤蓄水性能指标测定和计算

方法参照中华人民共和国林业行业标准《森林土壤水分—物理性质的测定》(LY/T 1215—1999)。采用公式^[13](7)~公式(9)计算土壤有效持水量(W'₀,t/hm²)、毛管持水量(W_c,t/hm²)和饱和持水量(W_t,t/hm²)。

$$W'_0=10000P_0h \tag{7}$$

$$W_c=10000P_ch \tag{8}$$

$$W_t=W'_0+W_c \tag{9}$$

式中:P₀、P_c分别为土壤非毛管孔隙度(%) and 毛管孔隙度(%);h 为土层厚度(m)。

1.2.3 土壤入渗测定 采用双环法测定土壤入渗特性^[14]。每个林地 3 次土壤入渗重复试验,取其平均值进行统计分析。土壤初渗透速率、稳渗速率的计算方法参照中华人民共和国林业行业标准《森林土壤渗透率的测定》(LY/1218—1999)。

采用 Excel 2010 进行数据处理,Origin 9.0 作图,运用 SPSS 19.0 对 3 种林地枯落物持水能力进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和多重比较(LSD)。

2 结果与分析

2.1 枯落物层水文特征

2.1.1 枯落物储量 不同林分类型枯落物的蓄积量存在差异,从表 2 可以看出,3 种林分中刺槐林最大,为 148.38 t/hm²,其次是油松×刺槐混交林和油松纯林,分别为 107.85 t/hm² 和 105.49 t/hm²。油松纯林未分解层蓄积量占总蓄积量的比例最大,刺槐纯林为 44.68%,其次是油松×刺槐混交林,为 37.54%,刺槐纯林最小,为 34.81%;而半分解层蓄积量占总蓄积量的比例则相反,但 3 种林分的半分解层蓄积量均大于未分解层。

表 2 不同林地枯落物层特征

林分 类型	枯落物厚度/cm			枯落物蓄积量				总储量/ (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)	比例/%	蓄积量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	
油松	1.51±0.06b	1.89±0.05a	3.40±0.03a	47.14±4.11a	44.68±2.42a	58.35±1.43c	55.32±2.43b	105.49±3.75b
刺槐	1.98±0.15a	1.62±0.24a	3.60±0.11a	51.66±2.79a	34.81±1.67b	96.72±2.56a	65.19±1.67a	148.38±2.32a
油松×刺槐	1.92±0.51a	1.86±0.07a	3.78±0.09a	40.47±3.81a	37.54±1.65b	67.38±1.90b	62.46±1.65a	107.85±5.69b

注:不同小写字母表示同一列数据间差异显著(P<0.05)。下同。

2.1.2 枯落物最大持水量(率) 从表 3 可以看出,3 种林地不同层次枯落物最大持水量为 82.26~117.99 t/hm²,油松×刺槐混交林最大持水量最大(117.99 t/hm²),其次为刺槐纯林(106.19 t/hm²),油松林最小(82.86 t/hm²)。最大持水率为 305.76%~387.12%,

依次为油松×刺槐混交林(387.12%)>刺槐纯林(324.31%)>油松纯林(305.76%)。3 种林分林下枯落物的最大持水率与最大持水量相对应的排序一致,说明枯落物的组成和储量对枯落物持水能力具有重要影响。

表 3 3 种林地枯落物最大持水率(量)

林分类型	最大持水率/%			最大持水量/(t·hm ⁻²)		
	未分解层	半分解层	平均	未分解层	半分解层	平均
油松	283.95±42.42b	327.57±39.12b	305.76c	76.33±12.58b	89.39±15.76c	82.86b
刺槐	373.20±29.71a	275.42±45.24c	324.31b	99.94±10.52a	112.44±14.42b	106.19a
油松×刺槐	352.00±44.83a	422.24±92.04a	387.12a	98.53±17.19a	137.45±28.40a	117.99a

2.1.3 枯落物有效拦蓄率(量) 从表 4 可以看出,3 种林地不同层次枯落物的有效拦蓄率变化规律相同,依次为油松×刺槐混交林((281.97±26.77)%)>油松纯林((198.22±23.08)%)>刺槐纯林((124.30±14.30)%)。而不同层次的有效拦蓄量的变化规律不同,未分解层有效拦蓄量为刺槐纯林((247.18±18.36)

t/hm²)>油松纯林((87.64±22.59)t/hm²)>油松×刺槐混交林((77.57±13.72)t/hm²);半分解层有效拦蓄量为刺槐纯林((144.26±23.00)t/hm²)>油松×刺槐混交林((120.90±17.47)t/hm²)>油松纯林((79.68±15.20)t/hm²)。综合 3 种林分枯落物层次拦蓄降雨变化规律,油松×刺槐混交林对降雨的拦蓄能力最强。

表 4 3 种林地枯落物有效拦蓄率(量)

林分类型	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
油松	198.22±23.08b	238.86±37.71b	218.54b	87.64±22.59b	79.68±15.20c	83.66c
刺槐	124.30±14.30c	119.21±14.00c	121.75c	247.18±18.36a	144.26±23.00a	195.72a
油松×刺槐	281.97±26.77a	302.45±57.51a	292.21a	77.57±13.72b	120.90±17.47b	99.24b

2.1.4 枯落物持水过程 3 种林地未分解层枯落物持水量和持水率随时间的变化见图 1a、图 1c 所示,半分解层枯落物持水量、持水率随时间的变化见图 1b、图 1d 所示,反映了不同林地枯落物吸水动态变化特征。由图 1 可知,枯落物在起初浸水 1 h 内,持水量迅速增加,随着浸泡时间的延长,增加速度较初始浸泡时明显减缓,至 24 h 枯落物的持水量基本达到饱和状态。从表 3 可知,通过回归分析得出油松、刺槐以及油松×刺槐混交林林地枯落物持水量与浸水时间呈对数函数关系:

$$y_1=a\ln t_1+b_c,R^2>0.91$$

式中: y_1 为枯落物持水量(t/hm²); t_1 为浸水时间(h); a 、 b 为待估参数。

从图 1e、图 1f 可知,枯落物的吸水速率与浸水时间呈“逆 J”形曲线,枯落物在浸泡水中的前 2 h 内吸水速率变化最快,之后又呈现迅速下降趋势,在 2~10 h 下降趋势逐渐变缓,10~24 h 逐渐趋停。刚浸入水中时,3 种林分枯落物吸水速率相差甚大,随着浸泡时间的延长,吸水速率趋势达到一致,这表明枯落物的持水随着浸泡时间的延长,已经到达饱和状态。从表 5 可以看出,通过拟合 3 种林分林下不同层次枯落物的吸水速率与浸水时间关系,二者呈幂函数关系:

$$v=kt_1^n,R^2>0.998$$

式中: v 为枯落物吸水速率(t/(hm²·h)); k 为系数;

n 为指数。

2.2 土壤层水文特征

2.2.1 土壤物理性质和持水能力 土壤密度和孔隙度是反映土壤物理性状的重要参数,密度是土壤紧实度的敏感性指标,反映土壤透水通气性能大小及阻碍根系生长发育。不同植被下土壤表层枯落物组成、分解状况和地下根系的生长发育存在差异,土壤密度与孔隙度受土壤发育状况的影响,从而造成土壤物理性质的差异^[15]。从表 6 可以看出,土壤密度均值为刺槐林地最大,油松×刺槐混交林地次之,油松林地最小。从 0—100 cm 土层厚度的垂直层次来看,油松和混交林地土壤密度随土层的增加而增加,而刺槐林地表现为降低趋势;总孔隙度基本上呈降低趋势。总孔隙度大,表明其土壤比较疏松,毛管孔隙度大,土壤中有效水的储量也越大。可见,油松纯林有效水储量最大。

非毛管孔隙与毛管孔隙的水分贮蓄量之和构成了土壤总贮水量,体现了土壤贮蓄和调节水分能力的大小,是土壤涵蓄潜力的最大值^[16]。非毛管孔隙度的大小决定了土壤有效持水量的多少,有效持水量大,说明其持水能力最强。由于 3 种林分的土壤物理性质存在差异,致其饱和持水量和有效持水量不尽相同。由表 6 可知,油松×刺槐混交林的土壤饱和持水量最大,达(522.14±13.69)t/hm²,刺槐纯林((500.85±4.17)t/hm²)次之,油松纯林((484.00±3.69)t/hm²)最小。油松×刺槐混交林的有效持水量最大,达(81.73±3.45)

t/hm²,刺槐纯林((67.22±3.07)t/hm²)次之,油松纯林最小,仅为(32.99±3.47)t/hm²。饱和持水量和有效持水量结果表明,油松×刺槐混交林有着较强的土壤蓄水能力,油松纯林较差。

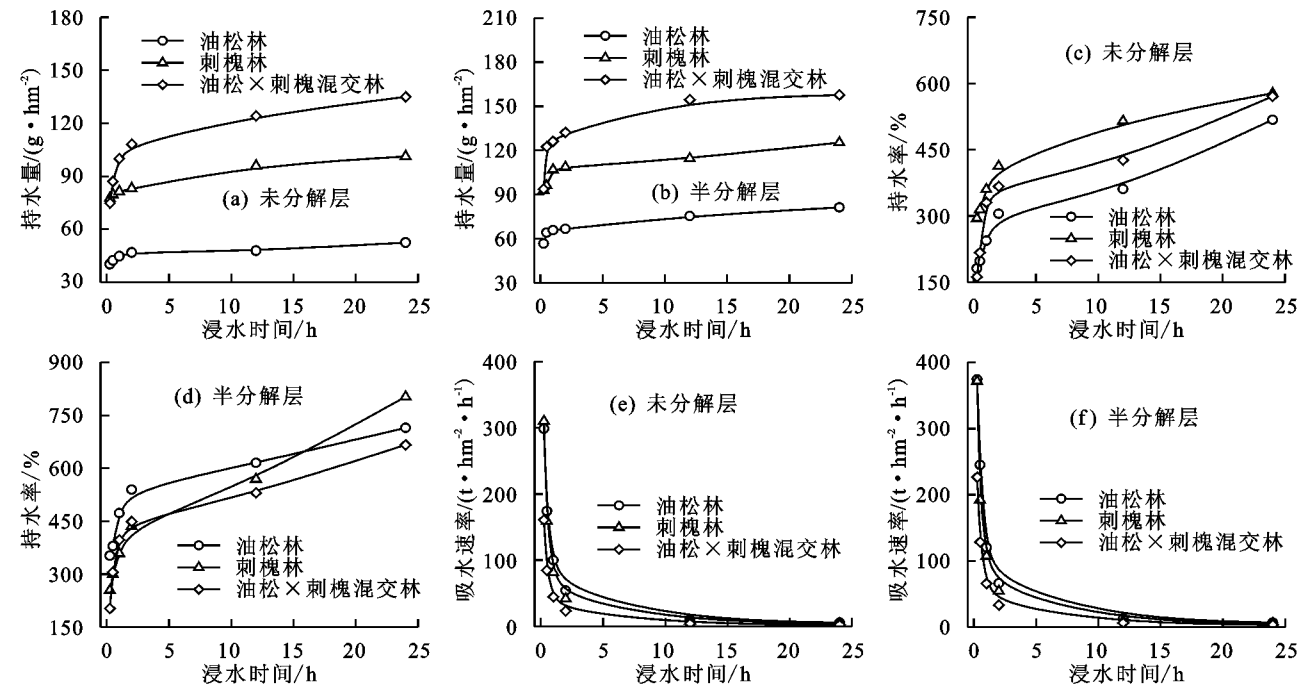


图 1 3 种林地枯落物持水量、持水率和吸水速率随时间的变化

表 5 3 种林地枯落物持水量(率)、吸水速率与浸水时间关系式

林分 类型	枯落 物层	持水量		持水率		吸水速率	
		关系式	R^2	关系式	R^2	关系式	R^2
油松	未分解	$y=2.3115\ln(t)+44.059$	0.9260	$y=66.991\ln(t)+253.31$	0.9147	$v=94.356t^{-0.88}$	0.9991
	半分解	$y=4.7587\ln(t)+64.921$	0.9586	$y=109.75\ln(t)+375.13$	0.933	$v=119.400t^{-0.9}$	0.9983
刺槐	未分解	$y=5.2970\ln(t)+82.646$	0.9549	$y=62.876\ln(t)+367.52$	0.9917	$v=82.398t^{-0.94}$	0.9998
	半分解	$y=6.4250\ln(t)+102.81$	0.9348	$y=76.447\ln(t)+458.14$	0.9695	$v=102.400t^{-0.94}$	0.9997
油松×刺槐	未分解	$y=12.430\ln(t)+95.965$	0.9796	$y=79.158\ln(t)+289.22$	0.9327	$v=43.937t^{-0.95}$	0.9998
	半分解	$y=12.469\ln(t)+122.22$	0.9109	$y=89.114\ln(t)+361.82$	0.9519	$v=64.597t^{-0.931}$	0.9997

表 6 3 种林地土壤物理性状及持水量

林分 类型	土层 深度/cm	土壤容重/ (g · cm ⁻³)	总空隙度/%	毛管 空隙度/%	非毛管 空隙度/%	饱和持水量/ (t · hm ⁻²)	有效持水量/ (t · hm ⁻²)
油松	0 — 20	0.89±0.04a	50.45±0.81a	41.13±0.01a	9.32±1.76ab	511.30±4.04c	48.65±3.78a
	20 — 40	0.98±0.07a	53.75±1.81a	42.04±0.01a	11.72±1.74a	494.50±9.04a	41.78±8.72a
	40 — 60	1.02±0.07a	48.25±0.82a	40.73±0.01a	7.52±0.90ab	481.21±4.10a	36.08±4.50bc
	60 — 80	1.04±0.33a	48.05±1.92a	44.44±0.01a	6.07±0.79b	473.26±2.60ab	16.87±3.93b
	80 — 100	1.02±0.03a	49.92±0.83a	42.44±0.01a	8.17±0.56ab	456.95±2.40a	21.57±2.82b
	总均值	0.99±0.02a	50.09±0.01a	42.44±1.24a	8.17±0.69b	484.00±3.69c	32.99±3.47c
刺槐	0 — 20	1.08±0.03a	52.35±2.22a	44.75±1.46a	7.60±1.47a	504.55±11.09a	66.05±7.32ab
	20 — 40	1.07±0.05a	50.45±0.72a	42.57±0.79a	7.88±1.45a	537.53±3.61a	68.82±7.25a
	40 — 60	0.98±0.09a	49.12±0.88a	41.02±1.56a	8.10±3.34a	482.47±4.40a	71.03±9.63a
	60 — 80	0.97±0.03a	48.33±1.42a	40.53±1.59a	7.80±1.35a	480.48±7.08a	67.97±9.20a
	80 — 100	0.96±0.05a	46.70±2.66bc	39.09±1.64a	7.60±1.84a	499.22±14.18a	66.05±9.21b
	总均值	1.01±0.03a	49.39±0.84b	41.59±0.71b	7.80±0.61a	500.85±4.17b	67.98±3.07b
油松×刺槐	0 — 20	0.89±0.05a	50.45±0.01a	41.13±0.01a	9.32±0.75a	527.97±4.04a	93.23±3.78a
	20 — 40	0.98±0.07a	53.75±0.02a	42.04±0.01a	11.72±1.74a	509.02±9.04a	117.18±8.72a
	40 — 60	1.02±0.07a	48.25±0.01b	42.04±0.01ab	7.52±0.01a	519.18±4.10a	75.20±4.50a
	60 — 80	1.04±0.03a	48.05±0.03b	40.73±0.01ab	6.23±0.01b	532.03±9.60a	62.33±3.93b
	80 — 100	1.03±0.05a	49.92±0.01ab	44.44±0.01ab	6.07±0.01c	522.48±2.40a	60.68±2.82b
	总均值	0.99±0.09a	50.09±0.014a	42.44±0.01b	8.17±0.01b	522.14±13.69a	81.73±3.45a

2.2.2 土壤入渗 土壤入渗能力是土壤重要的水分物理性质之一,是反映林分涵养水源的重要指标。土壤入渗能力的好坏直接关系到地表产生径流的大小,入渗能力越高,地表径流越少,土壤侵蚀量也会相应减少^[16]。由图 2 可知,3 种林分土壤的初渗速率相差较大,在 1.59~3.81 mm/min 间变动,初渗速率最大为油松林地,最小为油松×刺槐混交林地,二者相差达 2.5 倍。土壤入渗开始,速率随时间变化由大逐渐减慢,直至趋于稳渗,稳渗速率最大为刺槐林地(0.59 mm/min),其次为油松×刺槐混交林地(0.55 mm/min),油松林地最小(0.18 mm/min)。

从达到稳渗的时间来看,不同林地土壤达到稳渗时间也不尽相同,油松林地达到稳渗需 14 min,而油松×刺槐混林地达到稳渗需 6 min。从初渗速率和达到稳渗时间可看出,油松×刺槐混林地土壤入渗能

力最强,油松林地最弱。如表 7 所示,对林地土壤入渗时间和入渗速率进行拟合,二者存在较好的幂函数关系,表达式为:

$$y_2=a_0t_1^{-b_0}, \text{ 且 } R^2>0.94$$

式中: y 为入渗率(mm/min); t_1 为入渗时间(min); a_0 、 b_0 为待估参数。

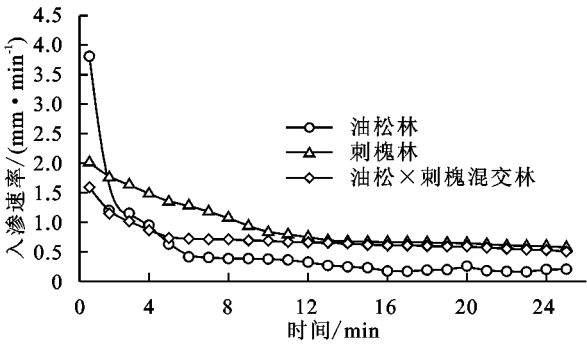


图 2 3 种林地土壤入渗速率

表 7 3 种林地土壤入渗速率拟合方程

林分类型	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	3.81	0.18	14	$y=2.8401t^{-0.912}$	0.9486
刺槐	2.01	0.59	13	$y=2.5192t^{-0.464}$	0.9518
油松×刺槐	1.59	0.55	6	$y=1.3922x^{-0.307}$	0.9530

3 讨论

3.1 不同林分类型枯落物层的水文特征

通过回归分析 3 种林地不同层次枯落物持水过程及持水速率,二者的关系符合 $Y_1=a\ln t_1+bc$,持水率与浸泡时间之间的关系符合 $v=kt_1^n$,这与胡晓聪等^[17]和杨振奇等^[18]的研究结果相似。采用室内浸泡法研究枯落物层的水文特征,虽然能在一定程度上反映枯落物层拦蓄降雨的能力,但是对于真实降雨事件情况下枯落物拦蓄降雨的能力应进一步研究。

油松×刺槐混交林地枯落物最大持水量最大,是因为该林地枯落物组成包括针叶和阔叶 2 种类型,其中,油松枯落物少但不易分解,增加了枯落物未分解层储量;刺槐枯落物量大却易分解,2 种枯落物储量的叠加提高了枯落物持水能力,所以其吸水能力较大;油松纯林枯落物储量处在最低值,所以其最大持水量较其他林分小;刺槐林地枯落物储量在未分解层和半分解层都较油松林地和油松×刺槐混交林高,但最大持水量却较油松×刺槐混交林略低,通过差异性分析,达显著差异水平($P<0.05$)。导致这种结果的原因也是由于枯落物组成、厚度、储量以及枯落物本身的分解程度不同所导致^[19]。

3.2 不同林分类型土壤层的水文特征

3 种林地在 0—100 cm 土层的土壤密度均值和

土壤总孔隙度均值都表现为油松纯林最大,刺槐纯林最小。油松纯林和混交林地土壤密度与土层厚度呈线性正相关关系,而刺槐林地土壤密度与土层厚度呈线性负相关关系,造成这种原因是因为随着土层深度的增加,土壤中有机质质量分数逐渐减少,土壤团聚性降低,从而增加了土壤的紧实度^[20],并且与土壤孔隙度和渗透率密切相关。

3 种林分下的土壤持水量不同,每 20 cm 土层厚度的饱和持水量最大的为油松纯林,油松×刺槐混交林次之,刺槐纯林最小。从有效持水量来看,每 20 cm 土层厚度的有效持水量表现为油松×刺槐混交林最大,刺槐纯林次之,油松纯林最小。出现这种现象的原因可能是枯落物在土壤表面堆积、分解等过程导致土壤团聚体比重增加。随着植被生长,根系不断生长,从而改善土壤结构。土壤持水能力与土壤孔隙度密切相关,土壤越疏松,土壤容重越小,孔隙度越大,土壤通气性和透水性越强^[21]。本研究油松林地土壤容重最大,该林地土壤通气性和透水性最差,刺槐林地和油松×刺槐混交林地土壤容重均比油松林地小,非毛管孔隙度比例也逐渐增加,导致土壤通气性和透水性提高,有效增加水分下渗,降低雨水的无效损失,减少表层土壤流失,进而大大提高林地土壤水源涵养功能。

土壤渗透性能是将地表径流转化为壤中流、地下径流的能力,对土壤水土保持及水源涵养的功能影响

较大。3种林地的土壤初渗速率表现为油松最大,主要与林地土壤结构有关。而土壤结构很大程度上受枯落物组成、分解程度影响较大,而枯落物分解程度与叶片倾角、太阳照射强度、照射面积、照射时长以及温度和土壤水的作用有很大关系^[22]。刺槐属于阔叶树种,油松属于针叶树种,刺槐落叶较油松落叶先分解。随着林地恢复年限增加,2种林地土壤结构得到改善。油松叶片分解不彻底导致表层土壤孔隙度较刺槐林地大,所以油松林地的初渗速率较刺槐林地和油松×刺槐混交林地大。

由于土壤改良程度不同,土壤表层腐殖质层厚度和生物结皮的状况不同^[23],因此不同林地土壤到达稳渗的时间也不同。土壤入渗过程开始,入渗速率随着时间的变化由大逐渐减慢,直至趋于稳渗,稳渗速率最大的为刺槐纯林(0.59 mm/min),其次为油松×刺槐混交林(0.55 mm/min)和油松纯林(0.18 mm/min)。这与油松林地土壤改良深度、根系分布状况以及林地“土壤干层”现象有关^[24],导致3种林分到达稳渗时间不同。从初渗速率的数值和达到稳渗的时间可知,油松×刺槐混林地的土壤入渗能力最强,油松纯林地最弱。对林地土壤入渗时间和入渗速率进行拟合分析,得出二者之间存在较好的幂函数关系,这与石媛等^[25]和王会京等^[26]的研究结果一致。

4 结论

(1)3种林地中,油松×刺槐混交林地枯落物的持水量最大,油松林地最小;最大持水率与最大持水量的排序一致。3种林地未分解层与半分解层枯落物的有效拦蓄率变化规律相同,不同分解程度的枯落物有效拦蓄量变化规律不同。枯落物总有效拦蓄率表现为油松×刺槐混交林((281.97±26.77)%)>油松纯林((198.22±23.08)%)>刺槐纯林((124.30±14.30)%);在未分解层中,刺槐林地枯落物有效拦蓄量最大,达(247.18±18.36)t/hm²,油松林地最小,为(87.64±22.59)t/hm²;半分解层中,油松×刺槐混交林有效拦蓄量((144.26±23.00)t/hm²)最大,油松地最小,为(79.68±15.20)t/hm²;3种林地枯落物持水量与浸水时间呈对数函数关系,3种林分林下不同层次枯落物的吸水速率与浸水时间关系呈幂函数关系, $R^2>0.9$ 。油松×刺槐混交林对降雨的拦蓄潜力最强。

(2)油松×刺槐混交林地土壤饱和持水量最大,达(522.14±13.69)t/hm²,刺槐林地((500.85±4.17)t/hm²)次之,油松林地((484.00±3.45)t/hm²)最小。油松×刺槐混交林地有效持水量最大,达(81.73±3.45)t/hm²,刺槐林地((67.22±1.34)t/hm²)次之,油松林地

有效持水量最小,仅为(32.99±3.47)t/hm²。林地土壤入渗时间和入渗速率之间存在较好的幂函数关系。综合3种林分枯落物层和土壤层的涵养水源能力来看,油松×刺槐混交林和刺槐纯林涵养水源能力较高,油松纯林涵养水源能力较差。

参考文献:

- [1] Edwards, David P, Tobias, et al. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2014,29(9):511-520.
- [2] Brantley S, Vose J M. Future species composition will affect forest water use after loss of eastern hemlock from southern Appalachian forests[J]. Ecological Applications A Publication of the Ecological Society of America, 2013,23(4):777-778.
- [3] 赵芳,李雪云,赖国桢,等.飞播马尾松林不同林下植被类型枯落物及土壤水文效应[J].中国水土保持科学,2016,14(4):26-33.
- [4] Waning R H, Schlesinger W H. Forest ecosystems: Concepts and management[M]. New York: Academic Press, 1985:181-210.
- [5] 宋小帅,康峰峰,韩海荣,等.太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报,2014,34(3):102-108.
- [6] 张宁,郭宾良,张楠,等.滦河典型林分枯落物层与土层的水文效应[J].水土保持通报,2015,35(3):44-48.
- [7] 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.
- [8] Guendehou G H S, Liski J, Tuomi M, et al. Test of validity of a dynamic soil carbon model using data from leaf litter decomposition in a West African tropical forest[J]. Geoscientific Model Development Discussions, 2013, 6(2):3003-3032.
- [9] Saura-Mas S, Estiarte M, Peñuelas J, et al. Effects of climate change on leaf litter decomposition across post-fire plant regenerative groups [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 77(2):274-282.
- [10] He X, Lin Y, Han G, et al. Litterfall interception by understorey vegetation delayed litter decomposition in Cinnamomum camphora, plantation forest [J]. Plant and Soil, 2013, 372(1/2):207-219.
- [11] 卢振启,黄秋嫻,杨新兵,等.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.
- [12] 茹豪.晋西黄土区典型林地水文特征及功能分析[D].北京:北京林业大学,2015.
- [13] 吴迪,辛学兵,赵明扬,等.北京九龙山不同林分枯落物及土壤水文效应[J].林业科学研究,2014,27(3):417-422.