

# 太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应

宋小帅, 康峰峰, 韩海荣, 于晓文, 周彬, 程小琴

(北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 通过定位试验结合室内测定的方法,研究了山西太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应。结果表明:(1) 不同郁闭度林分枯落物储量变化范围为 7.43~10.86 t/hm<sup>2</sup>,随郁闭度增加枯落物储量增加;最大持水率变化范围为 276.54%~311.33%,最大持水深为 8.02~14.34 mm,表现为(按郁闭度排序):0.7>0.6>0.8>0.5,郁闭度为 0.7 林分的枯落物持水效果最好;枯落物未分解层和半分解层持水量与浸泡时间呈明显对数关系( $R>0.87$ ),持水速率与浸泡时间呈明显幂函数关系( $R>0.94$ )。(2) 不同郁闭度林分土壤容重变化范围为 1.36~1.49 g/cm<sup>3</sup>,总孔隙度均值变化范围为 44.71%~48.75%,有效持水量变化范围为 395.33~831.00 t/hm<sup>2</sup>,表现为(按郁闭度排序):0.6>0.7>0.5>0.8;稳渗速率变化范围为 1.00~3.47 mm/min。

**关键词:** 油松人工林; 郁闭度; 枯落物; 土壤; 水文效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0102-07

中图分类号: S715

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.020

## Hydrological Effects of Forest Litters and Soil in *Pinus Tabulaeformis* Plantation Under Different Degrees of Canopy Coverage in Taiyue Mountains

SONG Xiao-shuai, KANG Feng-feng, HAN Hai-rong, YU Xiao-wen, ZHOU Bin, CHENG Xiao-qin

(Key Laboratory of Forest Cultivation and Conservation of the Ministry of Education and the Province, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A study was conducted at different degrees of canopy coverage in *Pinus tabulaeformis* plantation in the Taiyue Mountains, Shanxi Province, to analyze the hydrological functions of litters and soil layers. The results showed that: (1) The total storage capacity of litter layers was about 7.43~10.86 t/hm<sup>2</sup>, and litters increased with canopy coverage increasing. The maximum water holding rate ranged from 276.54% to 311.33% and the maximum water holding depth, from 8.02 to 14.34 mm, showing an order in canopy coverage of 0.7>0.6>0.8>0.5. The forest with canopy coverage of 0.7 showed better water holding capability. Water holding rate and soaking time without decomposition litters and semi-decomposition litters had a visible logarithmic relationship( $R>0.87$ ), and absorption speed rate and immersion time had a power function relationship( $R>0.94$ ). (2) The average soil bulk density for different degrees of canopy coverage ranged from 1.36 to 1.49 g/cm<sup>3</sup>; total soil porosity, from 44.71% to 48.75%; effective water storage, from 395.33 to 831.00 t/hm<sup>2</sup>, and soil stable infiltration rate, from 1.00 to 3.47 mm/min.

**Keywords:** *Pinus tabulaeformis*; canopy coverage; litters; soil; hydrological effect

水源涵养能力是森林生态系统的主要功能之一,降水被植被林冠层截留一部分以后,剩余部分经重新分配以后降落到地面<sup>[1]</sup>。中国学者对降水分配的研究已经比较多,随着研究的深入,作为森林生态系统水文过程和水源涵养功能的主体部分的森林枯落物层和土壤层的水文效应逐渐成为研究的热点<sup>[2-5]</sup>。结构疏松的枯落物层作为森林水文效应的第二作用层

吸收和截留降水,减弱雨滴对土壤的击溅,减少地表径流对土壤的侵蚀<sup>[6]</sup>。国内外对不同分布区不同森林类型的枯落物的水文功能曾进行了大量的研究<sup>[7]</sup>。土壤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。森林土壤因为受到森林凋落物、林木根系及伴生的微生物群的影响,具有特殊的物理—水文特征。森林土壤研究是研

收稿日期:2013-07-20

修回日期:2013-07-28

资助项目:国家林业公益性行业科研专项“华北典型林分类型土壤碳储量分布格局及变化规律的研究”(201104008);国家林业局 948 项目“基于森林生态系统管理的人工林经营技术引进”(2010-4-15)

作者简介:宋小帅(1987—),男(汉族),山西省晋城市人,硕士研究生,研究方向为森林生态学。E-mail:swxwky@163.com。

通信作者:韩海荣(1963—),男(汉族),青海省西宁市人,博士,教授,主要从事森林生态学研究。E-mail:hanhr@bjfu.edu.cn。

究水分在流域空间分布,揭示产流机理的主要环节<sup>[8]</sup>。随着森林的生长,土壤物理性状不断变化,结构改善,生物多样性增加<sup>[9-10]</sup>,不同时间、不同深度、不同植被状况下的土壤的水分动态不尽相同<sup>[11]</sup>。油松是华北地区的主要水源涵养树种,已有学者对其林冠截留特性进行过研究<sup>[12]</sup>,但对其枯落物和土壤的水文效应研究还较少,而且由于立地条件限制,各地油松人工林的郁闭度不尽相同,单纯研究某一郁闭度林分不能准确评估其水文效应。本文选取太岳山不同郁闭度人工油松林为研究对象,对不同郁闭度林分下枯落物和土壤的水文效应进行定量分析,旨在揭示不同郁闭度油松林枯落物层和土壤层水源涵养功能,为油松林的营造及其生态功能的研究提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于山西省太岳山林区中部,山西省沁源县东部,属太岳林局马泉林场,地理坐标为  $36^{\circ}31' - 36^{\circ}44'N, 112^{\circ}15' - 112^{\circ}33'E$ 。现有森林面积  $3\,719.4\text{ hm}^2$ ,其中有林地  $2\,774.6\text{ hm}^2$ ,未成林造林地  $33.1\text{ hm}^2$ 。有林地覆盖率为  $74.6\%$ 。该区森林总蓄积  $1.23 \times 10^5\text{ m}^3$ ,油松人工林占森林面积的  $95.2\%$ ,以中、幼龄林为主。该区气候属暖温带半干旱大陆性季风气候,四季分明,春季多风,相对湿度  $60\% \sim 65\%$ ,年平均降水量  $662\text{ mm}$ ,雨量集中在 7—9 月,占全年降雨量

的  $60\%$ 以上,年平均气温为  $8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均日照  $2\,500 \sim 2\,700\text{ h}$ ,年平均无霜期  $179\text{ d}$ 。该地区主要为大起伏喀斯特侵蚀高中山地,基岩以石灰岩为主,土壤类型多为褐土、棕壤。

马泉林场优势树种为油松(*Pinus tabulaeformis*),灌木主要有酸枣(*Ziziphus jujuba*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、杠柳(*Periploca sepium*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黄刺梅(*Rosa xanthina*)等,草本层的主要代表植物有苔草(*Carex tristachya*)、羊胡子草(*Carex rigescena*)、小红菊(*Dendranthema chanelii*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

2011 年 3 月在对试验区全面踏查的基础上,依据林龄、坡度等主要因子,选择具有代表性的油松人工林标准样地 4 块进行人工间伐作业使其郁闭度不同,间伐后保留树木空间均匀分布,采用系统样点观测法测定其郁闭度,在标准地沿对角线前进并一米一抬头,判断样点是否为树冠遮盖,统计被遮盖样点数,即可算出郁闭度,即:郁闭度 = 被树冠遮盖的样点数 / 样点总数。每块样地的面积均为  $20\text{ m} \times 30\text{ m}$ ,样地概况见表 1。8 月底进行枯落物和土壤水文效应试验。

表 1 山西省太岳山林区中部样地概况

编号	郁闭度	林龄/ a	密度/ (株· $\text{hm}^{-2}$ )	坡度/ ( $^{\circ}$ )	坡向	坡位	海拔/ m	平均胸径/ cm	平均树高/ m
1	0.8	22	6 024	28	正东	中下	1 222	5.99	5.87
2	0.7	20	4 850	21	正东	下	1 176	6.36	6.15
3	0.6	20	4 238	22	正东	中下	1 215	5.88	5.93
4	0.5	20	3 800	25	正东	下	1 208	5.95	6.42

### 2.2 枯落物层水文特征测定

2.2.1 枯落物储量测定 每个样地内沿着对角线选定 5 个  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的小样方,对枯落物未分解层厚度和半分解层厚度进行测定,并分别收取称重。然后混合取样称重,把样品带回实验室置于  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  的烘箱中  $24\text{ h}$ ,称重。

2.2.2 枯落物持水过程测定 将枯落物未分解层和半分解层分别装入尼龙袋,在清水中浸泡 1, 1.5, 2, 4, 6, 10, 24 h,静置 5 min 直到不再滴水后称重,每个样品重复 3 次。浸水 24 h 后的持水量即为枯落物的最大持水量。浸水静置后的枯落物湿重与烘干后干重差值即为枯落物浸泡不同时间的持水量,该差值与浸水时间的比值为枯落物的持水速度,浸水 24 h 后

的持水率作为最大持水率,用百分比( $\%$ )表示。每次测得的枯落物湿重与其风干重之差,即为枯落物在不同时间内的浸水持水量,该值与浸水时长的比值为枯落物的吸水速率。

### 2.3 土壤层水文特征测定

2.3.1 土壤物理性质测定 在标准样地内按 S 形分别选取 3 个试验点进行土壤剖面的挖掘,并且记录土层厚度,根据土层厚度情况,按人工分层(0—20, 20—40, 40—60 cm)用环刀分别取土,每层重复取土 3 次,装入铝盒内,带回实验室。用环刀法分层测定容重、总孔隙度以及毛管孔隙度。

2.3.2 土壤入渗过程测定 用双环刀法进行土壤入渗能力的测定。把用环刀取回的土样浸水 24 h,浸水

时必须保持水面与环刀上口齐平,使水平面低于环刀上口的土面。到一定时间将环刀取出,拿掉盖子,上面套上一个空环刀,连接处用胶布封好再用熔蜡粘合住,防止接口处出水,最后将接合的环刀放于漏斗上,漏斗下承接烧杯。实验开始时往上面的空环刀中加水,使得水面比环刀口低 1 mm。自漏斗下滴第 1 滴水时开始计时,每隔 1, 2, 3, 5, 10, 15 min, 更换 1 次漏斗下面的烧杯,并分别测量渗出的水量  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_5, Q_{10}, Q_{15}, \dots, Q_n$ 。每换 1 次烧杯要往上面环刀面加水至原来高度,试验持续到渗出水量稳定为止。

$$V = (10 \times Q_n) / (T_n \times S) \quad (1)$$

式中:  $V$ ——渗透速率 (mm/min);  $T_n$ ——每次渗透间隔时间 (min);  $Q_n$ ——间隔时间内渗透水量 (ml);  $S$ ——环刀面积 (cm<sup>2</sup>)。

$$W_t = 10\,000 P_t h \quad (2)$$

式中:  $W_t$ ——土壤饱和蓄水量 (t/hm<sup>2</sup>);  $P_t$ ——土壤总孔隙度 (%);  $h$ ——土层厚度 (m)。下同。

$$W_0 = 100\,000 P_0 \quad (3)$$

式中:  $W_0$ ——土壤有效蓄水量 (t/hm<sup>2</sup>);  $P_0$ ——土壤非毛管孔隙度 (%).

$$W_c = 100\,000 P_c h \quad (4)$$

式中:  $W_c$ ——土壤毛管蓄水量 (t/hm<sup>2</sup>);  $P_c$ ——土壤毛管孔隙度 (%).

### 3 结果与分析

#### 3.1 枯落物水文效应分析

3.1.1 枯落物储量 枯落物层是土壤与降水接触的缓冲面,可以防止雨滴对土壤的击溅,并在不断的产生和分解过程中改善土壤的结构和性质,保持水土,涵养水源。准确估算枯落物储量是定量评价森林功能和科学经营森林生态系统的基础。枯落物储量与林分生长发育状况有关,还受自身分解状况和累积年限的直接影晌。

从表 2 可以看出,枯落物储量变动范围为 7.43~10.86 t/hm<sup>2</sup>,不同郁闭度林分枯落物储量与郁闭度呈正相关关系,即随郁闭度增大,枯落物蓄积量也增加。郁闭度不同使得林内光照、温度、湿度等条件不同,在年凋落量相差不大的情况下,郁闭度大的林分枯落物分解速度慢,储存量也越多。不同郁闭度林分内均表现出半分解层枯落物储量多于未分解层。郁闭度 0.5 林分的未分解层占总储量的比例最大,为 38.36%,郁闭度 0.8 林分的未分解层所占比例最小,为 24.40%;半分解层则是郁闭度 0.8 林分的半分解层占总储量的比例最大,为 75.60%,郁闭度 0.5 林分的半分解层所占比例最小,为 61.51%。这是由于林

分郁闭度较大时,地表枯落物接受到的降水和光照少,枯落物分解速度缓慢,枯落物经年累积,大部分处于半分解状态。

表 2 不同郁闭度林地枯落物储量概况

郁闭度	储量/(t·hm <sup>-2</sup> )			储量比例/%	
	半分解层	未分解层	总储量	半分解层	未分解层
0.8	8.21	2.65	10.86	75.60	24.40
0.7	5.79	2.88	8.67	66.78	33.22
0.6	5.28	2.43	7.71	68.48	31.52
0.5	4.57	2.85	7.43	61.51	38.36

3.1.2 枯落物持水能力 枯落物层的持水能力是森林下层水文功能的重要组成部分,是整个森林生态系统水分循环中的重要一环,被看作是反映枯落物层水文作用的重要指标。通常采用枯落物干物质的最大持水量和最大持水深来表征枯落物的水文作用,除了与储量有关外,其值的大小也因林分类型、林龄、自身结构及分解程度的不同而有差别<sup>[5]</sup>。

由表 3 可知,只有郁闭度 0.8 林分的未分解层自然含水率大于半分解层,这是因为该林分冠层遮蔽过于严重,林下未分解枯落物可接收到的光照很有限,所含水分蒸发缓慢,使未分解层在较长时间内保持湿润;其他各林分枯落物的半分解层自然含水率均大于未分解层,郁闭度 0.7 林分的枯落物两层的含水量差值最明显,达 23.11%。不同郁闭度林分的最大持水率变动范围为 276.54%~311.33%,郁闭度 0.7 和 0.6 林分的枯落物最大持水率较高,郁闭度 0.8 和 0.5 林分的枯落物最大持水率较低,适中的林分郁闭度使枯落物结构发育合理,可以最大限度地吸持水分。一般来说枯落物分解程度越高,其含水量相对越大,所以可以认为分解程度高的枯落物层的持水能力越大。最大持水深变化范围为 8.02~14.34 mm,郁闭度 0.7 林分的枯落物最大持水深最大;郁闭度 0.5 林分的枯落物最大持水量最小。林下枯落物均表现出半分解层最大持水量大于未分解层的现象,说明半分解层在枯落物拦蓄降水的过程中起主要作用。最大持水率和最大持水深的大小排序不相同,这是因为最大持水率受到枯落物结构和蓄积量的影响,而且枯落物的持水能力因枯落物分解程度的不同而不同。从最大持水率和最大持水深的变化可知,郁闭度 0.7 的林分下的枯落物持水效果最好。

3.1.3 枯落物持水过程分析 枯落物的吸水速度与浸泡时间存在一定关系,吸水总量还与其分解程度有关。通过浸水实验,观察和分析了不同分解程度枯落物的持水过程。

表 3 不同郁闭度林地枯落物持水特点

郁闭度	自然含水率/%		最大持水率/%	最大持水深/mm		
	未分解层	半分解层		未分解层	半分解层	合计
0.8	53.63	44.00	276.54	2.93	5.86	8.80
0.7	48.43	71.54	281.12	4.59	9.75	14.34
0.6	48.89	57.59	311.33	3.54	8.26	11.80
0.5	43.41	54.46	280.31	2.10	5.92	8.02

图 1 为各郁闭度林分枯落物未分解层持水重量随浸泡时间的变化关系。从图 1 中可以看出,不同郁闭度下均表现出在开始浸泡的第 1 个小时内,持水量快速上升,尤其在前 30 min 枯落物持水重量迅速增加,随后变化逐渐平缓至不增加或略有变化,一般浸泡约 8~10 h 后未分解层枯落物持水量达到其最大值。在前 30 min 内郁闭度 0.5 的林分下枯落物持水量增加最少,为 20.92 g,郁闭度 0.8 的林分下枯落物持水量增加最多,为 26.83 g。郁闭度 0.7 的林分未分解层的最大持水量最高,为 52.31 g,郁闭度 0.5 的林分的未分解层的最大持水量最低,为 39.84 g。这是由于未分解层枯落物在拦蓄降水和径流时,在开始阶段发挥的功能较强,随后随着吸持水量增加,湿润程度增加,吸持能力降低,直至达到饱和,也即未分解层持水能力受自身干燥程度影响。

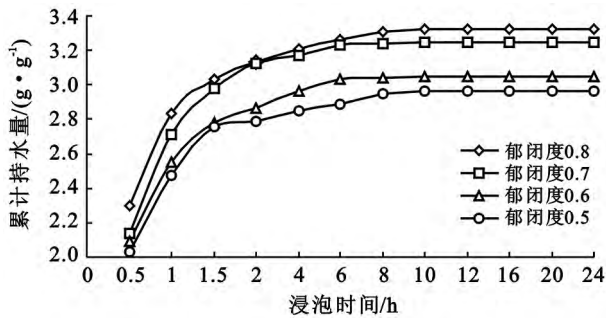


图 1 不同郁闭度林地枯落物未分解层持水过程

图 2 为各郁闭度林分枯落物半分解层持水重量随浸泡时间的变化关系。从图 2 中可以看出前 30 min 内吸水迅速,然后吸水量增加变慢,变化趋势逐渐平缓。一般浸泡 6 h 左右吸水量不再增加,达到饱和。在前 30 min 内郁闭度 0.5 的林分的半分解层持水量最少,为 80.10 g,持水量最多的是郁闭度 0.7 的林分的半分解层,为 156.73 g;郁闭度 0.7 的林分的半分解层的最大持水量最高,为 182.12 g,郁闭度 0.5 的林分的半分解层的最大持水量最低,为 100.42 g。

枯落物吸持水的速度和总量与枯落物的干燥程度、枯落物分解程度和枯落物结构有关,枯落物越干

燥,吸持水的速度越快;枯落物分解越完全,短时间内的吸持水量越大。枯落物分解层和未分解层均表现出前 1 h 内吸水速率达到最大值,吸水迅速,随后吸水量缓慢增加,未分解层浸泡 8~10 h 至饱和,半分解层需 6 h 左右,说明 4 种郁闭度林分枯落物半分解层持水能力均小于未分解层,降水落到枯落物层时半分解层先达到饱和,降水持续累积,枯落物持水效果降低,对土壤的保护作用和地表径流形成的阻滞作用都减小。半分解层持水总量远多于未分解层,说明半分解层是枯落物水文效应的主要作用者。郁闭度 0.7 的林分下枯落物半分解层持水效果最显著,枯落物层持水量最大,说明其涵养水源的能力最强。

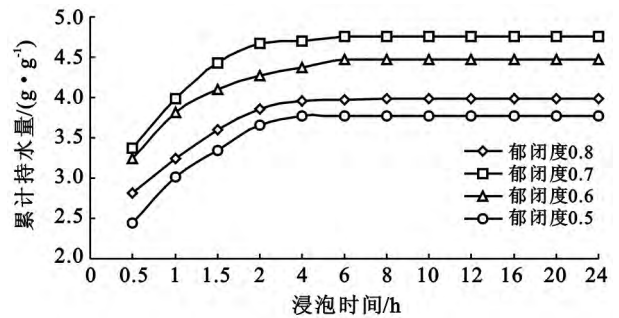


图 2 不同郁闭度林地枯落物半分解层持水过程

对不同层次枯落物持水量与浸泡时间的关系进行回归分析,得出其关系方程为:

$$Q = a \ln t + b \quad (R > 0.87) \quad (5)$$

式中:  $Q$ ——枯落物持水量 ( $g/g$ );  $t$ ——浸泡时间 ( $h$ );  $a, b$ ——方程系数。

3.1.4 枯落物持水速率分析 枯落物持水速率与浸泡时间有明显关系。从图 3 可以看出不同郁闭度林分的枯落物的未分解层和半分解层持水速率随浸泡时间的变化趋势相似,均表现为前 2 h 内持水速率降低迅速,4 h 后下降速度明显减缓,10~12 h 后持水速率趋于 0。还可以看出半分解层持水速率大于未分解层,说明枯落物分解程度越高,其持水性能越好。

对不同郁闭度枯落物未分解层和半分解层持水速率与浸泡时间进行回归分析(表 4),得出其关系方程为:

$$V = kt^n \quad (R > 0.94) \quad (6)$$

式中:  $V$ ——枯落物持水速率 [ $g/(g/h)$ ];  $t$ ——浸泡时间 ( $h$ );  $k$ ——方程系数;  $n$ ——指数。

### 3.2 土壤水文效应分析

3.2.1 土壤容重分析 一般认为容重小的土壤疏松,透水性、通气性较好,植物根系伸展的阻力也小,有利于拦蓄降水,减少径流冲刷,容重大则相反。从表 5 可以看出,在 0—60 cm 土层内,不同郁闭度林

分土壤容重均值排序为: 0.6(1.33 g/cm<sup>3</sup>) < 0.7(1.36 g/cm<sup>3</sup>) < 0.5(1.43 g/cm<sup>3</sup>) < 0.8(1.49 g/cm<sup>3</sup>), 即林分郁闭度 0.6 时土壤容重最小, 郁闭度增大或减小, 土壤容重会增加。土壤容重在不同郁闭度林分都表现出随土壤深度增加容重逐渐增大的趋势。在容重均值最大的郁闭度 0.8 的林分内, 容重从 0—20 cm 时的 1.40 g/cm<sup>3</sup> 增加到 40—60 cm 时的 1.55 g/cm<sup>3</sup>;

在容重均值较小的郁闭度 0.7 的林分内, 容重从 0—20 cm 时的 1.32 g/cm<sup>3</sup> 增加到 40—60 cm 时的 1.43 g/cm<sup>3</sup>。随着土壤深度增加, 土壤团聚性降低, 深层土壤变得紧实, 而且其中有机质含量也减少, 从而使土壤容重形成这种变化趋势。不同郁闭度林分植被状况、林下枯落物组成及分解的差异也对土壤容重变化有影响。

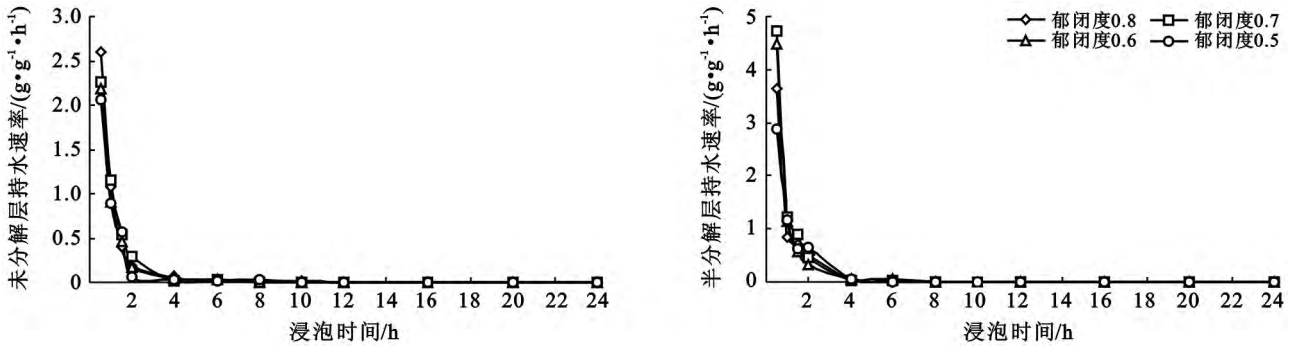


图 3 不同郁闭度林地不同层次枯落物持水速率与浸泡时间的关系

表 4 不同郁闭度林分不同层次枯落物持水量、持水速率与浸泡时间的关系

枯落物层	郁闭度	持水量与浸泡时间		持水速率与浸泡时间	
		关系式	R	关系式	R
未分解层	0.8	$Q=0.477 2\ln t+2.245 1$	0.912 0	$V=0.794 3t^{-1.896}$	0.991 7
	0.7	$Q=0.505 5\ln t+2.119 7$	0.882 7	$V=0.882 0t^{-2.263}$	0.977 4
	0.6	$Q=0.451 2\ln t+2.032 0$	0.908 4	$V=0.810 7t^{-2.270}$	0.971 7
	0.5	$Q=0.434 0\ln t+1.979 2$	0.906 1	$V=0.620 9t^{-1.920}$	0.950 3
半分解层	0.8	$Q=0.587 6\ln t+2.678 1$	0.902 7	$V=1.126 9t^{-2.283}$	0.977 8
	0.7	$Q=0.649 6\ln t+3.319 7$	0.876 4	$V=1.357 6t^{-2.514}$	0.977 3
	0.6	$Q=0.586 5\ln t+3.155 1$	0.906 8	$V=1.167 3t^{-1.930}$	0.991 2
	0.5	$Q=0.637 6\ln t+2.351 7$	0.885 8	$V=1.132 8t^{-1.788}$	0.949 5

表 5 不同林地土壤物理性质和持水量

郁闭度	土壤深度/cm	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%
0.8	0—20	1.40	34.43	23.72	58.15
	20—40	1.53	18.31	26.48	44.79
	40—60	1.55	6.56	24.64	31.20
	均值	1.49	19.77	24.95	44.71
0.7	0—20	1.32	31.29	22.87	54.16
	20—40	1.34	30.25	18.79	49.04
	40—60	1.43	26.00	15.87	41.87
	均值	1.36	29.18	19.18	48.36
0.6	0—20	1.23	43.79	6.91	50.70
	20—40	1.35	41.56	8.23	49.79
	40—60	1.41	39.31	6.44	45.75
	均值	1.33	41.55	7.20	48.75
0.5	0—20	1.42	26.28	21.28	47.56
	20—40	1.43	23.20	19.03	42.23
	40—60	1.44	22.23	19.98	42.21
	均值	1.43	23.90	20.10	44.00

3.2.2 土壤孔隙度分析 从表 5 可知, 总孔隙度方面, 不同郁闭度林分都表现为随着土壤深度的增加, 总孔隙度逐渐减小, 0—60 cm 土壤总孔隙度均值排序为: 0.6 > 0.7 > 0.5 > 0.8, 变化范围为 44.00% ~ 48.75%, 表现为林分郁闭度从 0.5 增加到 0.6 时, 土壤总孔隙度增加, 然后随着郁闭度增大, 土壤总孔隙度有所减少。

不同郁闭度林分的土壤非毛管孔隙度也表现为随着土壤深度增加而逐渐减小, 这是由于表层土壤中根系活动和腐殖质积累使其土壤结构发生了变化。非毛管孔隙度大的土壤通透性好, 有利于水分下渗, 降水可以较快地到达下层土壤, 能有效防止洪水的发生。不同郁闭度林分土壤非毛管孔隙度均值排序为: 0.6 > 0.7 > 0.5 > 0.8, 变化范围为 19.77% ~ 41.55%。

毛管孔隙度随土壤深度变化的变化不明显, 不同郁闭度林分的土壤毛管孔隙度均值排序为: 0.8 > 0.5 > 0.7 > 0.6, 变化范围为: 7.20% ~ 24.95%。

3.2.3 土壤蓄水能力分析 由图 4 可知,不同郁闭度林分土壤蓄水量存在明显差异,饱和蓄水量取决于土壤总孔隙度,代表着土壤的潜在持水能力。土壤饱和蓄水量最大的是郁闭度 0.6 的林分,为 974.93 t/hm<sup>2</sup>,最小的是郁闭度 0.8 的林分,为 894.27 t/hm<sup>2</sup>。毛管蓄水量随郁闭度没有显著变化,郁闭度 0.8 的林分最大,0.6 的林分的最小,其差值为 355.00 t/hm<sup>2</sup>。有效蓄水量取决于土壤非毛管孔隙度,反映了土壤调节水分的能力,不同郁闭度林分土壤有效蓄水量排序为:0.6>0.7>0.5>0.8,变化范围为 395.33~831.00 t/hm<sup>2</sup>,说明郁闭度 0.6 的林分土壤涵养水源能力最强。

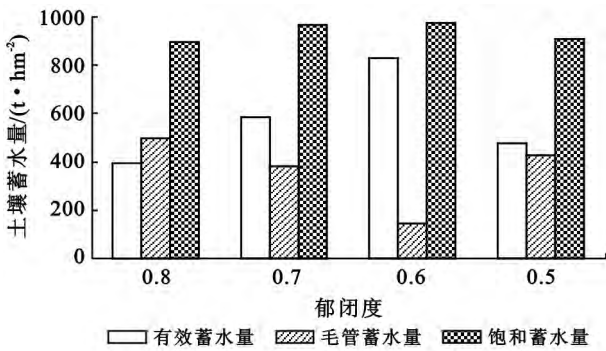


图 4 不同郁闭度林分土壤层蓄水能力

3.2.4 土壤入渗性质分析 土壤入渗能力直接影响水分在土壤中的运移,它与土壤质地、结构、孔隙度、有机质含量等有关,入渗能力高的土壤可以保证降水在土壤层的快速运动,减少地表径流量。土壤渗透性能越好,地表径流越少,土壤的流失量也相应减少(表 6)。

表 6 不同林地不同深度土层渗透性能

郁闭度	土壤层次/cm	渗透速率/(mm·min <sup>-1</sup> )		稳渗时间/min
		初渗速率	稳渗速率	
0.8	0—20	27.00	2.50	30
	20—40	17.50	1.10	30
	40—60	14.00	0.98	30
	均值	19.50	1.53	30
0.7	0—20	27.00	4.70	25
	20—40	23.00	3.70	35
	40—60	21.00	2.00	30
	均值	23.67	3.47	30
0.6	0—20	25.50	2.20	35
	20—40	19.00	1.90	35
	40—60	10.50	1.50	20
	均值	18.34	1.87	30
0.5	0—20	16.50	1.50	20
	20—40	12.00	1.10	25
	40—60	6.00	0.40	15
	均值	11.50	1.00	20

从表 6 可以看出,不同郁闭度的土壤在相同浸水时间内,由浅层到深层,初渗速率和稳渗速率都呈减小的趋势。初渗速率最大的是郁闭度 0.7 林分的土壤,为 23.67 mm/min;初渗速率最小的是郁闭度 0.5 林分的土壤,为 11.50 mm/min。稳渗速率最大的是郁闭度 0.7 林分的土壤,为 3.47 mm/min;稳渗速率最小的是郁闭度 0.5 林分的土壤,为 1.00 mm/min。郁闭度 0.7 林分的土壤初渗速率和稳渗速率均最大,说明降水在其土壤表面能较快地下渗,在地表停留时间短,不易形成地表径流,较好的阻滞了地表径流产生。

不同郁闭度林分土壤达到稳渗时间一般在 30 min 左右,郁闭度 0.5 林分的 40—60 cm 土层达到稳渗只需 15 min,可能与其林木根系活动较少使得较深层次土壤紧实有关。

## 4 结论

(1) 太岳山油松人工林不同郁闭度枯落物蓄积量范围为 7.43~10.86 t/hm<sup>2</sup>,与白晋华等<sup>[13]</sup>在文峪河流域次生林区的研究相近(11.90 t/hm<sup>2</sup>),比北京山区油松人工林枯落物现存量(6.37 t/hm<sup>2</sup>)多<sup>[14]</sup>,低于山西文峪河流域油松林枯落物储量(18.62 t/hm<sup>2</sup>),更少于冀北山地(33.93 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[15-16]</sup>。造成这些差异的原因可能是北京山区油松林组成较单纯,层次结构简单,覆被率不高,郁闭度只有 0.3,而且分布在阴坡;山西文峪河流域油松分布在半阳坡,郁闭度为 0.75,与本研究地区相近;冀北山地研究区的油松林郁闭度达到 0.85,而且枯落物厚度也较大(6.1 cm)。枯落物未分解层蓄积量为半分解层的 1.6~3 倍。最大持水率变化范围为 276.54%~311.33%,最大持水深变化范围 8.02~14.34 mm,半分解层持水作用比未分解层大,与北京山区<sup>[17]</sup>相比,由于两地枯落物未分解层、半分解层组成比例相近,枯落物持水规律也相似。

相同浸水时间内,半分解层吸水量比未分解层多,宋庆丰等<sup>[18]</sup>在河北雾灵山、王士永等<sup>[14]</sup>在北京山区也得到相同的结果。不同郁闭度林分枯落物未分解层和半分解层持水量与浸泡时间呈对数关系:Q=a ln t+b,R>0.87;持水速率与浸泡时间呈幂函数关系:V=kt<sup>n</sup>,R>0.94。

(2) 不同郁闭度林分土壤容重均值大小排序为:0.8>0.5>0.7>0.6,变化范围为 1.33~1.49 g/cm<sup>3</sup>。随土壤深度增加容重逐渐增大,非毛管孔隙度、总孔隙度、最大持水量逐渐减小,这与王轶浩等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。不同郁闭度林分的 0—60 cm 土壤总孔隙度均值排序为:0.6>0.7>0.5>0.8,变化范围为 44.00%~48.75%;非毛管孔隙度均值排序为:0.6>

0.7>0.5>0.8,变化范围为 19.77%~41.55%;毛管孔隙度随土壤深度变化的变化不明显,郁闭度 0.8 林分的土壤毛管孔隙度最大,郁闭度 0.6 林分的最小,变化范围为:7.20%~24.95%。

(3) 与华北地区其他典型林分相比,油松林土壤蓄水量最少<sup>[4]</sup>。不同郁闭度林分土壤饱和蓄水量大小排序为:0.6>0.7>0.5>0.8,波动范围为 894.27~974.93 t/hm<sup>2</sup>;郁闭度为 0.8 林分土壤的毛管蓄水量最大,0.6 的最小,变化范围为 143.93~498.93 t/hm<sup>2</sup>;有效蓄水量大小按郁闭度排序为:0.6>0.7>0.5>0.8,变化范围为 395.33~831.00 t/hm<sup>2</sup>。

(4) 不同郁闭度林分土壤的稳渗速率大小按郁闭度排序为:0.7>0.6>0.8>0.5,变化范围为 1.00~3.47 mm/min。

综上所述,郁闭度为 0.7 的太岳山油松人工林水文功能显著,林下枯落物持水效果明显,枯落物最大持水量最大。郁闭度为 0.6 林分的土壤物理结构理想,蓄水容量大,入渗速率大,有利于降雨下渗,可以有效的涵养水源,防止水土流失。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘世荣,温远光,王兵. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京:中国林业出版社,1996:61-62.
- [2] 周祥,赵一鹤,张洪江,等. 云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究[J]. 生态环境学报,2011,20(2):248-252.
- [3] 罗跃初,韩单恒,王宏昌,等. 辽西半干旱区几种人工林生态系统涵养水源功能研究[J]. 应用生态学报,2004,15(6):919-923.
- [4] 饶良懿,朱金兆,毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报,2005,27(1):33-37.
- [5] 陈华,田汉勤. 全球变化对陆地生态系统枯落物分解的影响[J]. 生态学报,2001,21(9):1549-1563.
- [6] 陈丽华,余新晓,张东升,等. 贡嘎山冷杉林区苔藓层截持降水过程研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(4):60-63.
- [7] 余新晓. 森林生态水文[M]. 中国林业出版社:2004.
- [8] 吴彦,刘庆,乔永康,等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J]. 植物生态学报,2001,25(6):648-65.
- [9] Binkley D, Giardina C. Why do tree species affect soils? The warp and woof of tree-soil interactions[J]. Biogeochemistry, 1998, 42(1/2): 89-106.
- [10] Turner M G, Gardner R H, Dale V H, et al. Predicting the spread of disturbance across heterogeneous landscapes[J]. Oikos, 1989,55(1):121-129.
- [11] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域:土地利用土地覆盖变化的国际研究动向[J]. 地理学报,1996,51(6):553-558.
- [12] 周彬,韩海荣,康峰峰,等. 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征[J]. 生态学报,2013,33(5):1645-1653.
- [13] 白晋华,胡振华,郭晋平. 华北山地次生林典型森林类型枯落物及土壤水文效应研究[J]. 水土保持学报,2009,23(2):84-89.
- [14] 王士永,余新晓,贾国栋,等. 北京山区主要人工林枯落物水文效应[J]. 中国水土保持科学,2011,9(5):42-47.
- [15] 郭汉清,白秀梅. 三种主要森林类型枯落物水文效应研究[J]. 山西水土保持科技,2006,2(2):13-15.
- [16] 梁文俊,丁国栋,周美思,等. 冀北山地油松和落叶松林下枯落物的水文效应[J]. 水土保持通报,2012,32(4):71-74.
- [17] 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.
- [18] 宋庆丰,杨新兵,张金柱,等. 雾灵山典型林分枯落物和土壤水文效应[J]. 生态环境学报,2009,18(6):2316-2320.
- [19] 王轶浩,王彦辉,谢双喜,等. 六盘山小流域地形、植被特征与土壤水文物理性质的关系[J]. 生态学杂志,2012,31(1):145-151.