

# 北京山地不同海拔人工油松林枯落物及其土壤水文效应

鲁绍伟<sup>1</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 潘青华<sup>1</sup>, 李少宁<sup>1</sup>, 张玉平<sup>1</sup>, 任翠梅<sup>2</sup>

(1. 北京市农林科学院 林业果树研究所, 北京 100093; 2. 黑龙江省农业科学院 大庆分院, 黑龙江 大庆 163316)

**摘 要:** 本文对北京山地 4 个海拔梯度(480, 540, 690, 820 m)的人工油松(*Pinus Tabuli formis*)林枯落物层及土壤层水文效应进行研究, 结果表明: 枯落物总蓄积量、最大持水量、有效拦蓄能力均随海拔先升高而后减小, 最大持水率随海拔升高先减小而后增大, 枯落物总储量在 10.63~31.42 t/hm<sup>2</sup> 之间, 最大持水量在 17.27~37.17 t/hm<sup>2</sup> 之间, 有效拦蓄能力在 6.72~28.71 t/hm<sup>2</sup> 之间, 最大持水率在 164.32%~185.77% 之间。枯落物持水量与浸泡时间呈明显的对数关系( $R > 0.93$ ), 枯落物吸水速率与浸泡时间呈明显的幂函数关系( $R > 0.73$ )。土壤容重随海拔的升高而增大, 变化范围为 0.97~1.22 g/cm<sup>3</sup>, 总孔隙度随海拔的升高而减小, 土壤层有效持水量随海拔的升高而减小, 土壤入渗速率与入渗时间呈明显幂函数关系( $R > 0.96$ )。综合分析各项因子, 低海拔地区的油松人工林水源涵养能力普遍高于高海拔。

**关键词:** 水土保持; 北京山地; 油松; 海拔; 枯落物; 土壤水文

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)06-0054-05

## Hydrological Effects of Forest Litters and Soil in *Pinus Tabuli formis* Plantations at the Different Altitudes of Mountains of Beijing

LU Shao-wei<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, PAN Qing-hua<sup>1</sup>, LI Shao-ning<sup>1</sup>, ZHANG Yu-ping<sup>1</sup>, REN Cui-mei<sup>2</sup>

(1. Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China; 2. Daqing Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing, Heilongjiang 163316, China)

**Abstract:** A preliminary study on hydrological effects of litter layers and soil layer in planted *Pinus Tabuli formis* forests was carried out at four different altitudes (480, 540, 690 m and 820 m) in Badaling Shifosi shallow mountain of Beijing. The result showed that the litter total storage capacity, the maximum water holding capacity and the modified interception capacity increased initially and then decreased, the maximum water holding rate decreased then increased, the total storage capacity of litter was about 10.63~31.42 t/hm<sup>2</sup>, the maximum water holding capacity was about 17.27~37.17 t/hm<sup>2</sup>, the modified interception capacity was about 6.72~28.71 t/hm<sup>2</sup>, the maximum water holding rate was about 164.32%~185.77%. Water holding capacity and soaking time of without decomposition litter and semi-decomposition litter both had visible logarithmic relationship ( $R > 0.93$ ), relationship between absorption rate and immersion time was described by power function ( $R > 0.73$ ). The soil bulk density increased with the increase of altitude, the average of soil bulk density ranged from 0.97 g/cm<sup>3</sup> to 1.22 g/cm<sup>3</sup>, with the altitudes increase, both the total soil porosity and the soil water-holding capacity decreased. The relation between infiltration rate and infiltration fit time can be described by power function ( $R > 0.96$ ). Generally, *Pinus tabulaeformis* forest at low altitude has the stronger water conservation function compared with that in high altitude.

**Key words:** soil and water conservation; mountain of Beijing; *Pinus Tabuli formis*; altitudes; litters; hydrology of soil

森林水文效应是生态系统中森林和水相互作用的综合功能的体现, 在涵养水源、净化水质、保持水土、消减洪峰及抵御旱涝灾害等方面发挥着巨大作用, 枯落物是森林生态系统中 3 个垂直结构上的重要功能层之一, 它在截持降水、防止土壤溅蚀、阻延地表

径流、抑制土壤水分蒸发、增强土壤抗冲性能等方面具有重要的意义, 而林地土壤的水文效应是探讨森林水文过程的基础和前提<sup>[1-3]</sup>。油松树杆通直, 材质坚硬, 耐腐朽, 是我国北方地区重要的森林更新、水土保持和造林树种。目前, 国内对油松人工林的研究

收稿日期: 2013-04-07

修回日期: 2013-04-23

资助项目: 北京市科技专项“石佛寺引种试验林评价及适生树种筛选”(Z111105055311043)

作者简介: 鲁绍伟(1969—), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与森林服务功能研究。E-mail: hblsw8@163.com

通信作者: 陈波(1987—), 男, 甘肃张掖人, 硕士, 研究实习员, 主要从事水土保持研究。E-mail: zhyechb2010@163.com

主要集中在不同生境生长状况、生物多样性、生态效益、空间结构等方面<sup>[4-7]</sup>,而对其在不同海拔的水文功能研究较少。因此,本文对北京山地不同海拔的油松人工林枯落物层和土壤层的水文效应进行定量研究,旨在揭示不同海拔油松人工林枯落物层和土壤层水源涵养功能,为油松人工林适宜生长的海拔条件提供一定的借鉴。

1 研究区概况

研究区八达岭石佛寺位于北京市延庆县东南水关长城脚下,属燕山山脉,为火成岩、花岗岩山地,东经 116°02′,北纬 40°20′,海拔 475~1 100 m,试验林地总面积 667 hm<sup>2</sup>。该地区属于北京北部山地气候温凉的 9°线以北地区,年平均气温为 9.3℃,极端最高 39℃,极端最低-25℃,无霜期 160 d,年均降水量 477.6 mm,主要集中在 7—8 月份,年均蒸发量为 1 828 mm。该地区属于暖温带阔叶林区,地带性植被为以栎林为代表的落叶阔叶林,以及油松林为代表的针叶林。由于原始林的砍伐和破坏,现有植被多为天然次杂木林及中、干生灌丛地带。土壤为北部山区褐色土壤,受森林的破坏及多年砍伐后萌生的次生林影响,腐殖质层较厚;乔木树种主要有:油松(*Pinus*)、侧柏(*Platycladus*)、核桃楸(*Juglans*)、华山松

(*Armandii*)、白皮松(*Bungeana*)、白杆(*Picea*)、山杨(*Populus*)和蒙古栎(*Quercus*)等。

2 研究方法

于 2012 年 6 月中旬在八达岭水关长城脚下石佛寺林业试验基地内选取 4 块不同海拔(480,540,690,820 m)的油松人工林进行采样分析,样地面积为 40 m×40 m,对其进行每木检尺,各样地基本特征见表 1。在 4 块标准地内,视地形变化设 1.0 m×1.0 m 样方 3 个,调查样方内枯落物层厚度及蓄积量。采用土壤剖面调查法,按 0—10,10—20,20—40 cm 机械分层取样。枯落物持水量和吸水速率的测定采用室内浸泡法<sup>[8-9]</sup>:分别测定其在浸泡 1 h、2 h、4 h、6 h、12 h、24 h 的重量变化,重复 3 次,研究其吸水过程和吸水速度。采用有效拦蓄量来估算枯落物对降雨的实际拦蓄量,即:

$$W=(0.85R_m-R_0)M^{[10]}$$

式中: $W$ ——有效拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>); $R_m$ ——最大持水率(‰); $R_0$ ——平均自然含水率(‰); $M$ ——枯落物累积量(t/hm<sup>2</sup>)。采用环刀浸泡法<sup>[11]</sup>测定土壤容重、孔隙度等物理性质,土壤入渗采用双环法<sup>[12]</sup>测定,土壤持水量  $W=10000Ph$ 。式中: $W$ ——土壤持水量(t/hm<sup>2</sup>); $P$ ——土壤孔隙度(‰); $h$ ——土层厚度(m)。

表 1 不同海拔标准地基本特征

样地号	海拔梯 度/m	坡度/ (°)	坡向	郁闭度	林龄/ a	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	平均 树高/m	平均 胸径/m	土壤 类型
I	480	35	EN	0.65	30	750	4.74	6.54	褐土
II	540	33	SW	0.6	30	525	5.23	6.41	褐土
III	690	22	SE	0.7	30	1733	5.68	8.95	褐土
IV	820	24	NE	0.7	30	2650	8.03	11.05	褐土

3 结果与分析

3.1 不同海拔枯落物蓄积量

由表 2 知,不同海拔枯落物总蓄积量有一定差别,变动范围为 10.63~31.42 t/hm<sup>2</sup>,总蓄积量大小依次是:样地II>样地I>样地IV>样地III,即油松人工林枯落物总蓄积量随海拔的升高先升高而后减小。分析 4 个海拔梯度枯落物未分解层、半分解层蓄积量可以看出,各层次储量所占比例不同:样地II和样地III半分解层的蓄积量均大于未分解层,样地I和样地IV半分解层的蓄积量均小于未分解层;未分解层I占总蓄积量的比

例最大,为 54.22%,样地III占总蓄积量的比例最小,为 43.09%,排序为样地 I>样地IV>样地 II>样地 III;半分解层样地 III 占总蓄积量的比例最大,为 56.91%,样地 I 占总蓄积量的比例最小,为 45.78%,排序为样地 III>样地 II>样地 IV>样地 I;即在未分解层随海拔的升高枯落物蓄积量先较小而后增加,而在半分解层则相反,说明低海拔(480 m)油松人工林枯落物分解速度较慢,这是因为低海拔阳光被高海拔树木遮挡,太阳光不能直射到低海拔林分地面,相对于高海拔来说,低海拔林分接受的阳光较少,使林下枯落物不能快速充分分解。

表 2 不同海拔枯落物厚度和储量

样地号	总厚度/ mm	总蓄积量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	未分解层			半分解层		
			厚度/mm	蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )	占总量/%	厚度/mm	蓄积量/(t·hm <sup>-2</sup> )	占总量/%
I	40.00	13.28	30.00	7.20	54.22	10.00	6.08	45.78
II	40.00	21.42	30.00	10.38	48.46	10.00	11.04	51.54
III	53.00	10.63	39.00	4.58	43.09	14.00	6.05	56.91
IV	48.00	111.48	37.00	5.88	51.22	11.00	5.60	48.78

3.2 不同海拔枯落物水文效应

3.2.1 不同海拔枯落物最大持水量 4 个海拔梯度枯落物的最大持水量和最大持水率如表 3 所示。由表 3 可知:枯落物最大持水量半分解层随海拔的升高先增大而后减小,未分解层则相反,总和最大的是样地 II,为 37.17 t/hm<sup>2</sup>,相当于 3.72 mm 的降雨,最小的是样地 III,为 17.27 t/hm<sup>2</sup>,排序为样地 II>样地 I>样地 IV>样地 III。枯落物最大持水率的变动范围为 164.32%~185.77%,顺序为样地 I>样地 II>样地 IV>样地 III,最大持水率呈现出随海拔升高先减小而后增大的趋势。样地 I、样地 II 两个海拔梯度下枯落物的最大持水量和最大持水率呈现出不同的规律,这是因为最大持水量与枯落物本身的蓄积量有关,而蓄积量又与枯落物的分解状况、厚度等有关。

表 3 不同海拔枯落物最大持水量和最大持水率

样地号	最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )			最大持水率/%		
	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	平均
I	15.18	9.78	24.96	210.73	160.81	185.77
II	29.62	7.55	37.17	285.22	68.39	176.81
III	8.13	9.14	17.27	177.57	151.07	164.32
IV	9.04	10.44	19.48	153.68	186.43	170.05

3.2.2 不同海拔枯落物有效拦蓄量 最大持水率一般只能反映枯落物层持水能力的大小,不能反映对实际降水的拦截状况。它没有考虑到雨前枯落物层的自然含水状况,用最大持水率来估算枯落物层对降雨的拦蓄能力会导致其值偏高,有效拦蓄量才是反映枯落物对一次降水拦蓄的真实指标。4 个海拔梯度不同层次枯落物的拦蓄能力不同(表 4),从有效拦蓄率看,未分解层和半分解层呈不同的变化规律,未分解层为:样地 II>样地 I>样地 IV>样地 III;半分解层

则为:样地 IV>样地 I>样地 III>样地 II,这是因为未分解层和半分解层的枯落物储量、吸水速率不同。从有效拦蓄量看,未分解层为:样地 II>样地 I>样地 IV>样地 III;半分解层样地 I>样地 IV>样地 II>样地 III,这主要与枯落物蓄积量有关;综合未分解层和半分解层的变化规律可知,样地 II 的枯落物有效拦蓄能力最强,为 28.71 t/hm<sup>2</sup>,相当于拦蓄 2.87 mm 的降雨,样地 III 最弱,为 6.72 t/hm<sup>2</sup>,只相当于拦蓄 0.67 mm 的降雨,即低海拔(540 m)拦蓄能力较强,高海拔(690 m)较弱。

表 4 不同海拔枯落物的拦蓄能力

枯落物层	样地号	自然含水率/%	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm <sup>-2</sup> )	有效拦蓄量深/mm
未分解层	I	15.38	163.74	11.79	1.18
	II	15.05	227.39	23.61	2.36
	III	73.52	77.42	3.55	0.36
	IV	24.23	106.39	6.26	0.63
半分解层	I	11.45	125.24	7.62	0.76
	II	11.95	46.18	5.1	0.51
	III	75.96	52.45	3.17	0.32
	IV	31.14	127.34	7.13	0.71

3.2.3 不同海拔枯落物持水过程 枯落物持水量与浸泡时间具有一定的相关关系(图 1)。由图 1 可知,在最初浸泡的半个小时内,枯落物持水量迅速增加,而后随着浸泡时间的延长呈现不断增加的趋势,且增加速度逐步放缓。这一趋势与枯落物拦蓄地表径流规律相似,即降雨初期,枯落物拦蓄地表径流能力较强,此后随枯落物湿润程度的增加,吸持能力降低。此外,未分解层持水过程为样地 II>样地 I>样地 III>样地 IV,即低海拔(540 m)持水量大,高海拔(820 m)持水量小。

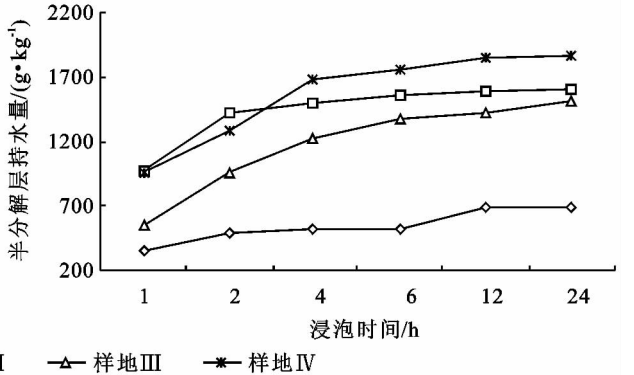
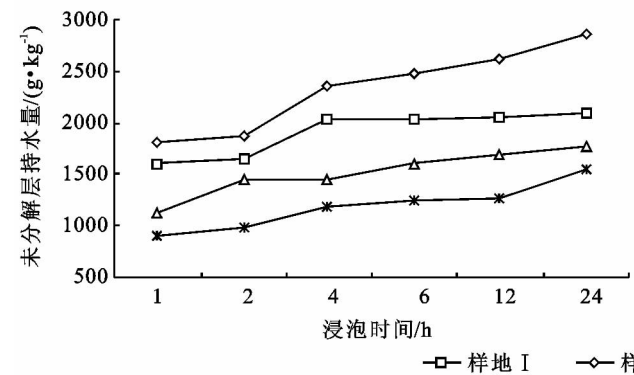


图 1 枯落物不同分解层持水量与浸泡时间的关系

对 1~24 h 之间 4 块样地不同海拔枯落物未分解层、半分解层持水量与浸泡时间的关系进行回归分析,得出该时间段内持水量与浸泡时间的关系(表 5):

$$Q=a\ln(t)+b \quad (R>0.93)$$

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

表 5 不同海拔枯落物持水量、持水率与浸泡时间关系

枯落物层	样地号	持水量与浸泡时间关系式	相关系数 R	持水率与浸泡时间关系式	相关系数 R
半分解层	I	$Q=339.88\ln(t)+1072.7$	0.9428	$V=1399.3t^{-1.4321}$	0.7991
	II	$Q=183.03\ln(t)+338.47$	0.9472	$V=461.25t^{-1.3300}$	0.8692
	III	$Q=542.96\ln(t)+582.02$	0.9922	$V=791.63t^{-1.1351}$	0.7365
	IV	$Q=539.77\ln(t)+977.42$	0.9826	$V=1309.0t^{-1.3080}$	0.8450
未分解层	I	$Q=311.97\ln(t)+1580.5$	0.9305	$V=2084.1t^{-1.5280}$	0.9137
	II	$Q=585.97\ln(t)+1694.2$	0.9532	$V=2275.5t^{-1.4369}$	0.9366
	III	$Q=354.12\ln(t)+1122.5$	0.9818	$V=1492.0t^{-1.4480}$	0.8786
	IV	$Q=317.84\ln(t)+837.12$	0.9326	$V=1132.0t^{-1.4208}$	0.9277

3.2.4 不同海拔枯落物吸水速率 由图 2 可知,4 块样地不同海拔梯度枯落物的吸水速率表现出一定的规律性:不论是未分解层还是半分解层枯落物在前半小时内吸水速率最大,之后急剧下降,这是因为枯枝落叶从风干状态浸入水中后,枯枝落叶表面水势差较大,吸水速率高;4 h 左右时下降速度明显减缓,24 h 吸水基本停止,随浸泡时间的延长,枯落物吸水速率趋向一致。这主要是因为随着浸泡时间的增加,枯

落物持水量接近其最大持水量,也就是说地被物逐渐趋于饱和,其持水量增长速度随之减缓所致。对 4 块样地不同海拔不同层次枯落物吸水速率与浸泡时间进行拟合,得出该时间段内吸水速率与浸泡时间之间存在如下拟合模型(表 5):

$$V=kt^n \quad (R>0.73)$$

式中:V——枯落物吸水速度[g/(kg·h)];t——浸泡时间(h);k——方程系数;n——指数。

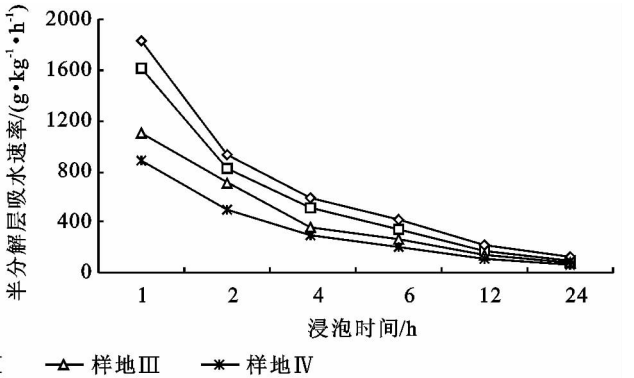
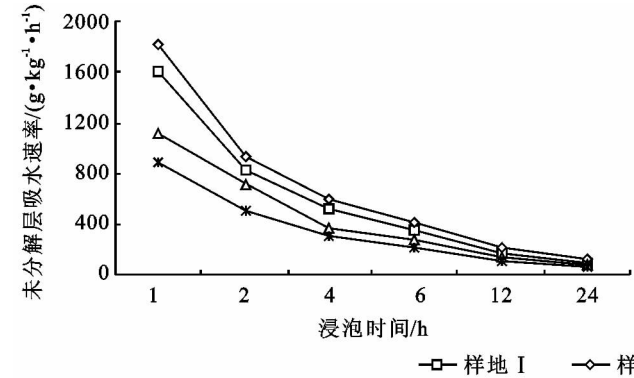


图 2 枯落物不同分解层吸水速率与浸泡时间的关系

3.3 不同海拔土壤物理性状及水文效应

3.3.1 不同海拔土壤容重 土壤容重表征土壤的松散程度及孔隙状况,反映了土壤的透水性、通气性和根系生长的阻力状况。土壤容重小,表明土壤疏松多孔,结构性良好,容重大则相反。由表 6 可知,不同样地土壤容重有较大差异,在 0—40 cm 土层内,土壤容重均值排顺序为样地Ⅳ>样地Ⅱ>样地Ⅲ>样地Ⅰ,即随海拔升高土壤总容重增大。从土壤容重的垂直变化来看,4 个海拔梯度土壤容重变化趋势相同,即随土层厚度的加深而逐渐增大。在容重均值最大的样地Ⅳ内,容重从 0—10 cm 时的 0.99 g/cm³ 增加到 20—40 cm 时的 1.28 g/cm³;在容重均值最小的样地Ⅰ内,容重从 0—10 cm 时的 0.88 g/cm³ 增加到 20—40 cm 时的 1.14 g/cm³。造成这种变化的原因主要是因为随深度增加,土壤中有机质含量逐渐减少,土壤团聚性降低,从而增加了土壤的紧实度,表层土壤疏松、底层土壤则相反。

3.3.2 不同海拔土壤孔隙度 由表 6 可知,从 4 个

海拔梯度总孔隙度的垂直变化来看,在 0—40 cm 土层内,均随着土层厚度的加深而减小,说明 4 个海拔梯度油松林表层土壤比较疏松,样地Ⅰ土壤的总孔隙度从 0—10 cm 的 66.93% 减小到 20—40 cm 的 54.85%,样地Ⅳ土壤的总孔隙度从 0—10 cm 的 48.73% 减小到 20—40 cm 的 48.16%。土壤总孔隙度均值顺序为样地Ⅰ>样地Ⅳ>样地Ⅲ>样地Ⅱ,即随海拔的升高总孔隙度减小。4 个海拔梯度土壤毛管孔隙度均值排序与孔隙度一致,毛管孔隙度越大,土壤中有效水的贮存量越大,树木用于自身生长发育所需的有效水分的比例越大;说明随海拔增加油松人工林土壤毛管孔隙度减小,即低海拔油松人工林用于自身生长发育所需的有效水分的比例大,高海拔则相反。土壤非毛管孔隙度均值排序为:样地Ⅰ>样地Ⅱ>样地Ⅲ>样地Ⅳ,非毛管孔隙度越大,土壤通透性越好,有利于降水的下渗,减少地表径流,充分起到涵养水源的作用,即低海拔(480 m)油松人工林地土壤的通透性最好,涵养水源作用最强。

表 6 不同海拔土壤物理性状及持水量

样地号	土层深度/ cm	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	非毛管 孔隙度/%	毛管孔 隙度/%	总毛管 孔隙度/%	有效持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	毛管持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	饱和持水量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
I	0—10	0.88	3.06	63.87	66.93	30.60	638.70	669.30
	10—20	0.88	2.65	59.72	62.37	26.54	597.20	623.74
	20—40	1.14	2.59	52.26	54.85	51.80	1045.20	1097.00
	均值	0.97	2.77	58.62	61.38	36.31	760.37	796.68
II	0—10	0.98	2.94	44.32	47.26	29.40	443.20	472.60
	10—20	1.24	2.04	38.18	40.22	20.40	381.80	402.20
	20—40	1.30	2.79	42.17	44.96	55.80	843.40	899.20
	均值	1.18	2.59	41.56	44.15	35.20	556.13	591.33
III	0—10	0.79	2.88	53.15	56.03	28.80	531.50	560.30
	10—20	1.22	2.27	40.08	42.35	22.70	400.80	423.50
	20—40	1.16	1.60	36.31	37.91	32.00	726.20	758.20
	均值	1.06	2.25	43.18	45.43	27.83	552.83	580.67
IV	0—10	0.99	2.49	46.24	48.73	24.90	462.40	487.30
	10—20	1.40	1.48	40.53	42.01	14.80	405.30	420.10
	20—40	1.28	1.28	46.88	48.16	25.60	937.60	963.20
	均值	1.22	1.75	44.55	46.30	21.77	601.77	623.53

3.3.3 不同海拔土壤蓄水能力 林地土壤的蓄水能力是评价森林涵养水源能力的重要指标,其大小与土壤厚度和土壤孔隙度状况有关。非毛管孔隙能较快吸收降水并及时下渗,有利于水源涵养。因此,不同林地土壤的非毛管孔隙度不同,林地的蓄水能力也不一样。从表 6 可知,不同海拔土壤蓄水性能存在一定差异,4 个海拔梯度土壤蓄水性能均随土层深度的增加呈减少趋势。从土壤饱和持水量均值来看,其大小顺序是:样地 I>样地 IV>样地 II>样地 III,样地 I 土壤贮蓄水分潜在能力比样地 III 高 137.20%,即低海拔(480 m)油松人工林土壤贮蓄水分潜在能力最强。土壤有效持水量大小取决于非毛管孔隙度的大小,有效持水量均值大小顺序是:样地 I>样地 II>样地 III>样地 IV,样地 I 有效持水量最大,说明低海拔(480 m)油松人工林持水能力最强,高海拔(820 m)最弱。

3.3.4 不同海拔土壤入渗 土壤的渗透性是林分涵养水源的重要指标。土壤渗透性的好坏,直接关系到地表产生径流的多少,渗透性能越好,地表径流越少,土壤侵蚀量也会相应减少。表 7 中 4 个海拔梯度下土壤的初渗速率相差较大,样地 I 初渗速率最大为 27.27 mm/min,III 最小为 13.64 mm/min,两者相差了 1.99 倍。随时间的推移,入渗速率逐渐减慢,当达到一定时间时趋于稳渗,稳渗速率在 1.54~6.67 mm/min 之间,大小顺序依次为:样地 I>样地 II>样地 IV>样地 III。入渗速率与入渗时间存在较好的幂函数关系(表 7),即:

$$y=at^{-b} \quad (R>0.96)$$

式中:y——入渗速率(mm/min);a,b——常数;t——入渗时间(min)。

表 7 不同海拔土壤渗透速率及渗透模型

样地号	初渗速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	稳渗速率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	回归方程	相关 系数 R
I	27.27	6.67	$y=15.695t^{-0.3105}$	0.9884
II	25.00	3.90	$y=10.073t^{-0.4358}$	0.9751
III	13.64	1.54	$y=9.2262t^{-0.7227}$	0.9666
IV	21.43	1.742	$y=10.203t^{-0.6427}$	0.9816

4 结 论

(1) 枯落物总蓄积量排序为:样地 II>样地 I>样地 IV>样地 III,未分解层随海拔的升高枯落物蓄积量先减小而后增加,半分解层则相反,说明中海拔枯落物分解速度较快。

(2) 枯落物最大持水量随海拔升高而减小,最大持水率随海拔升高先减小。

(3) 从枯落物持水过程看,在最初浸泡的 0.5 h 内,枯落物持水量迅速增加,以后随浸泡时间的延长增加速度逐渐变缓。不同层次枯落物的有效拦蓄率不同,但拦蓄量变化相同。

(4) 在 0—40 cm 土层内,土壤容重随海拔的升高而增大,且同一海拔土壤容重随土层厚度的增加而增大,总孔隙度随海拔升高而减小。

(5) 土壤饱和持水量均值排序为:样地 I>样地 IV>样地 II>样地 III,即低海拔油松人工林土壤贮蓄水分潜在能力最强。土壤有效持水量均值顺序是:样地 I>样地 II>样地 III>样地 IV,即低海拔油松人工林持水能力最强,高海拔最弱。

(6) 初渗速率相差较大,样地 I 初渗速率最大,样地 III 最小;稳渗速率低海拔较好,入渗速率与入渗时间存在较好的幂函数关系。

营密度对枯落物层持水能力的影响,结合华北落叶松人工林枯落物持水能力密度控制图得出:

(1) 华北落叶松人工林适宜初植密度。华北落叶松属于长寿树种,在研究区立地环境下培育的水源涵养林,至林分成熟阶段,密度应该控制在  $800 \sim 1\,000$  株/ $\text{hm}^2$ 。研究区华北落叶松人工林 15 a 左右开始修枝,20 a 华北落叶松人工林最佳密度为  $2\,500$  株/ $\text{hm}^2$ ,此密度可作为华北落叶松人工林的初植密度。

(2) 华北落叶松人工林不同林龄的经营密度。华北落叶松人工林下枯落物最大持水量和有效持水量均达到最大时 20 a 的林分经营密度为  $2\,500$  株/ $\text{hm}^2$ ,30 a 的林分经营密度为  $1\,800$  株/ $\text{hm}^2$ ,40 a 的林分经营密度为  $1\,000$  株/ $\text{hm}^2$ ,50 a 的林分经营密度为  $800$  株/ $\text{hm}^2$ 。随着林分密度的增加,枯落物层最大持水量和有效持水量的变化呈现先增后减的趋势。

(3) 通过建立等树高线、等直径线、最大密度线、自然稀疏线、蓄积量与含水量关系的模型,可以编制不同林分的水源涵养功能密度控制图。华北落叶松人工林枯落物层水源涵养能力密度控制图在产量预估、资源调查、林木间伐等方面使用方便,对生产实践及调控森林水源涵养功能具有重要意义,可为华北落叶松人工林经营管理提供新的途径。

#### 参考文献:

- [1] 徐学华,于树峰,崔立志,等.冀北山地华北落叶松人工

林水源涵养功能分析[J].水土保持研究,2009,16(5):162-166.

- [2] 剪文灏,李淑春,陈波,等.冀北山区三种典型森林类型枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2011,18(5):144-147.
- [3] 高岗.以水源涵养为目标的低功能人工林更新技术研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2009.
- [4] 张光灿,周泽福.五台山华北落叶松水源涵养林密度结构与生长动态[J].中国水土保持科学,2007,5(1):1-6.
- [5] 陈波,孟成生,赵耀新,等.冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(3):216-221.
- [6] 李军,田超,杨新兵.河北省木兰林管局典型森林类型枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2011,18(4):192-196.
- [7] 史晓巍.水源涵养林功能指标与结构指标的定量模拟[D].哈尔滨:东北林业大学,2007.
- [8] 王晶,莫非,段文标,等.六盘山南坡不同密度华北落叶松水源林生长过程比较[J].应用生态学报,2009,20(3):500-506.
- [9] 鲁绍伟,刘凤芹,余新晓,等.北京山区不同密度油松结构与功能研究[J].水土保持研究,2008,15(2):117-120.
- [10] 周国相.经营密度对杨桦次生林土壤含水量及林分生长量的影响[J].林业勘察设计,2012,1(1):88-90.
- [11] 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.
- [12] 贾志军,王富,甄宝艳,等.不同生态修复措施下桃林口水库水源涵养区枯落物的蓄水保水效益[J].水土保持研究,2012,19(3):136-139.

(上接第 58 页)

#### 参考文献:

- [1] 韩永刚,杨玉盛.森林水文效应的研究进展[J].水土保持研究,2008,15(6):105-107.
- [2] 龚固堂,陈俊华,黎燕琼,等.四川盆地四种柏木林分类型的水文效应[J].生态学报,2011,31(10):2716-2726.
- [3] 刘硕.青海省大通县主要造林树种枯落物水文效应研究[J].亚热带水土保持,2010,22(4):13-16.
- [4] 白岗栓,侯喜录,张占雄.油松—沙棘混交模式对生境和油松生长的影响[J].林业科学,2006,42(8):37-43.
- [5] 田育新,李锡泉,吴建平,等.小流域森林生态系统林地土壤渗透性能研究[J].水土保持研究,2006,13(4):173-175.
- [6] 赵荣慧,胡承海,孔祥君,等.中国辽西地区油松针阔混交林生态效益的研究[J].生态学报,1983,3(4):341-348.

- [7] 王龙,宋维峰,杨寿荣,等.广西龙脊梯田区森林枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2011,18(6):84-88.
- [8] 陈波,孟成生,赵耀新,等.冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(3):216-221.
- [9] 剪文灏,李淑春,陈波,等.冀北山区三种典型森林类型枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2011,18(5):144-147.
- [10] 田超,杨新兵,李军,等.冀北山地阴坡枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2011,25(2):97-103.
- [11] 陈波,杨新兵,赵心苗,等.冀北山地 6 种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(2):196-201.
- [12] 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.