

试验研究

北京市松山不同海拔油松林枯落物及土壤水文效应

鲁绍伟¹, 高琛², 李少宁¹, 陈波², 潘青华¹, 张玉平¹

(1. 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093;

2. 河北农业大学 林学院, 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 河北 保定 071000)

摘要: 以北京市松山 4 个海拔梯度(751, 890, 1 012 和 1 211 m)的油松(*Pinus tabulaeformis* Carr)天然林为对象, 对其枯落物层及土壤层水文效应进行研究。结果表明: (1) 枯落物总蓄积量、枯落物最大持水量和最大持水率均随海拔的升高先增大后减小; (2) 枯落物的总储量为 9.03~27.75 t/hm², 最大持水量为 26.66~90.54 t/hm², 与浸泡时间呈明显的对数关系($R>0.93$); 最大持水率为 287.62%~296.73%, 与浸泡时间呈明显的幂函数关系($R>0.99$); (3) 土壤容重随海拔升高而减小, 其变化范围为 1.38~1.66 g/cm³, 总孔隙度随海拔升高先减小后增大; (4) 土壤初渗速率相差较大, 稳渗速率为 1.95~7.06 mm/min, 入渗速率与入渗时间呈幂函数关系($R>0.70$)。综合分析得出, 低海拔油松天然林水源涵养功能较强。

关键词: 水文效应; 油松; 海拔; 枯落物; 北京市松山

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0001-06

中图分类号: S715.7

Hydrological Effects of Forest Litters and Soils of *Pinus Tabulaeformis* Forest at Different Altitudes of Songshan Mountains in Beijing City

LU Shao-wei¹, GAO Chen², LI Shao-ning¹, CHEN Bo², PAN Qing-hua¹, ZHANG Yu-ping¹

(1. Forestry and Pomology Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China; 2. Key Laboratory of Genetic Resources of Forest and Forest Protection of Hebei Province, School of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: A preliminary study on hydrological effects of litter and soil layers in natural *Pinus tabulaeformis* forest was carried out at four different altitudes(751, 890, 1 012 and 1 211 m) in the Songshan Mountains in Beijing City. Results showed that: (1) The total storage capacity, maximum water holding capacity and maximum water holding rate of litter increased firstly and then decreased with increasing altitude. (2) The total storage capacity of litter was about 9.03~27.75 t/hm². The maximum water holding capacity of litter was about 26.66~90.54 t/hm² and had a visible logarithmic correlation with immersion time($R>0.93$). The maximum water holding rate of litter was about 287.62%~296.73% and had a power relation with immersion time ($R>0.99$). (3) The soil bulk density decreased with increasing altitude in the range from 1.38 to 1.66 g/cm³. The total soil porosity decreased firstly and then increased with altitude. (4) The initial infiltration rates of soils were largely different and the steady infiltration rates varied from 1.95 to 7.06 mm/min. The infiltration rate had power function correlation with infiltration time($R>0.70$). Generally, *Pinus tabulaeformis* forest at low altitude has a stronger water conservation function.

Keywords: hydrological effect; *Pinus tabulaeformis*; altitude; litter; Songshan Mountains in Beijing City

森林对人类生态环境的显著影响, 已经越来越引起人们的重视。作为地球上可再生自然资源及陆地生态系统的主体, 森林在人类生存和发展的历史过程中具有不可替代的作用^[1]。森林中的枯落物结构疏松, 具有较强的吸水能力和透水性能, 不但可以防止

雨滴的击溅和径流的冲刷, 而且对土壤的形成发育具有重要作用。同时, 水文效应的研究对森林开发和营造、环境质量的控制和改善均有重要意义^[2]。油松(*Pinus tabulaeformis* Carr)在北京市无论是山区还是平原随处可见, 是较好的水土保持、用材和造林绿化

收稿日期: 2013-02-22

修回日期: 2013-04-11

资助项目: 林业公益性行业科研专项“都市型自然保护区保护与适应关键技术研究”(201004053)

作者简介: 鲁绍伟(1969—), 男(汉族), 河北省秦皇岛市人, 博士, 研究员, 研究方向为水土保持及森林生态服务功能。E-mail: hblsw8@163.com。

通信作者: 高琛(1991—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 在读硕士, 研究方向为水土保持。E-mail: pdsgc1991@163.com。

树种。目前,中国对油松林的研究主要集中在生态效益^[3]、生物多样性^[4]和不同气候条件下生长状况^[5]等方面,而对其在垂直梯度下水文效应的研究相对较少。为此,本文对北京市松山不同海拔油松天然林枯落物及土壤水文效应进行定量分析,旨在初步揭示不同海拔油松天然林枯落物层和土壤层的水源涵养功能,为油松天然林的生长提供一定的参考。

1 研究区概况

北京市松山国家级自然保护区位于北京市延庆县境内西北部,地理坐标为东经 115°43′44″—115°50′22″,北纬 40°29′9″—40°33′35″。保护区西北与河北省赤城县境内的大海坨国家级自然保护区相接,西南与河北省怀来县接壤,东与北京市玉渡山自然保护区毗邻,南与延庆县张山营镇相邻。面积 4 660.0 hm²,海拔为 628~2 198 m,处于暖温带大陆性季风气候区。受地形条件的影响,气温偏低,湿度偏高,具有典型的山地气候特征。年降水量约 450 mm,局部地段可达 600 mm,年蒸发量约 1 700 mm。该区土壤呈垂直带

谱分布,自下而上分为山地暗棕壤土带、棕色针叶林土带、亚高山疏林草甸土带和高山苔原土带。保护区现有维管束植物 109 科 413 属 783 种及变种,占北京市地区同类植物总数的 49.8%。乔木树种有山杨(*Populus davidiana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、秀丽槭(*Acer elegantulum*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、黑桦(*Betula dahurica*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和华山松(*Pinus armandii*)等。

2 材料与方法

2012 年 8 月底在北京市松山自然保护区调查不同海拔高度的油松天然林。选取 4 块代表性的地段作为样地进行采样分析。样地面积为 50 m×50 m,对其进行每木检尺,各样地基本特征见表 1。根据地形变化情况在每块样地内分别设 1.0 m×1.0 m 9 个样方,调查样方内枯落物层厚度及蓄积量。采用土壤剖面调查法,分别按 0—10,10—20,20—40 cm 分层取样。

表 1 不同海拔样地基本特征

样地号	海拔梯度/m	坡度/(°)	坡向	郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm
I	1 211	42	W	0.70	19.46	32.69
II	1 012	42	W	0.75	7.34	15.67
III	890	31	EW	0.74	10.98	15.48
IV	751	27	EW	0.78	8.93	12.84

枯落物持水量和吸水速率测定采用室内浸泡法^[6],分别测定枯落物在浸泡 2,4,6,12 和 24 h 后的变化,3 次重复,研究其吸水过程和吸水速度。枯落物拦蓄量采用有效拦蓄量估算枯落物对降雨的实际拦蓄量^[7],即:

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

式中:W——有效拦蓄量(t/hm²);R_m——最大持水率(%);R_o——平均自然含水率(%);M——枯落物累积量(t/hm²)。

用环刀浸泡法测土壤容重、孔隙度等土壤物理性质^[8],3 次重复。公式如下:

$$\text{土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{[(\text{环刀重量} + \text{烘干土重量}) - \text{环刀重量}]}{100}$$

$$\text{最大持水量}(\text{t}/\text{hm}^2) = \frac{[(\text{环刀浸水 24 小时重量} - (\text{环刀重量} + \text{烘干土重量})) / \text{烘干土重量}] \times 100}{100}$$

$$\text{毛管持水量}(\text{t}/\text{hm}^2) = \frac{[(\text{环刀控水 24 小时重量} - (\text{环刀重量} + \text{烘干土重量})) / \text{烘干土重量}] \times 100}{100}$$

$$\text{土壤非毛管孔隙度}(\%) = \frac{[(\text{最大持水量} - \text{毛管持水量}) / \text{土壤容重}] \times 100}{100}$$

$$\text{土壤毛管孔隙度}(\%) = \text{毛管持水量} \times \text{土壤容重}$$

$$\text{土壤总孔隙度}(\%) = \text{土壤非毛管孔隙度} + \text{土壤毛管孔隙度}$$

双环法测土壤入渗^[9],土壤持水量采用下式^[7]:

$$W = 10\,000 Ph$$

式中:W——土壤持水量(t/hm²);P——土壤孔隙度(%);h——土壤层厚度(m)。

3 结果与讨论

3.1 不同海拔枯落物蓄积量分析

由表 2 可知,不同海拔油松天然林枯落物总蓄积量变动在 9.03~27.75 t/hm²,大小排序为:样地 I > 样地 III > 样地 IV > 样地 II,即油松天然林枯落物总蓄积量随海拔降低先减小后增大。分析 4 个海拔梯度枯落物未分解层、半分解层蓄积量可以得出,各层次储量所占比例不同,半分解层的蓄积量均大于未分解层蓄积量。样地 III 未分解层占总蓄积量的比例最大,为 25.95%,样地 IV 占的比例最小,为 14.73%,排序为:样地 III > 样地 II > 样地 I > 样地 IV。样地 IV 半分

解层占总蓄积量的比例最大,为 85.27%,样地Ⅲ占的比例最小,为 74.05%,排序为:样地Ⅳ>样地Ⅰ>样地Ⅱ>样地Ⅲ,即未分解层和半分解层枯落物蓄积量随海拔的降低均呈现出先减小后增大的规律。这与陈波等^[10]在冀北山地对不同海拔华北落叶松人工林水文效应的研究结果不一致,原因是研究所选取的树种不一致,油松枯落物易分解而华北落叶松枯落物不易分解,且与海拔和枯落物储量相差较大有关。

表 2 不同海拔枯落物厚度、储量、最大持水量和最大持水率

枯落物层	样地号			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
枯落物总厚度/mm	55.00	45.00	50.00	35.00
总蓄积量/(t·hm ⁻²)	27.75	9.03	27.63	23.89
厚度/mm	15.00	15.00	20.00	15.00
未分解层蓄积量/(t·hm ⁻²)	4.31	1.61	7.17	3.52
占总量/%	15.53	17.83	25.95	14.73
厚度/mm	40.00	30.00	30.00	20.00
半分解层蓄积量/(t·hm ⁻²)	23.44	7.42	20.46	20.37
占总量/%	84.47	82.17	74.05	85.27
最大持水量/(t·hm ⁻²)	未分解层	12.09	4.44	16.66
	半分解层	70.88	22.22	73.87
	总 和	82.97	26.66	90.54
最大持水率/%	未分解层	280.53	275.82	232.40
	半分解层	302.38	299.41	361.06
	平 均	291.46	287.62	296.73

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 2 所示。半

分解层和未分解层枯落物最大持水量均呈现出随海拔降低先减小后增大的规律。总和最大的是样地Ⅲ,为 90.54 t/hm²,相当于 9.05 mm 的降水,最小的是样地Ⅱ,为 26.66 t/hm²,相当于 2.67 mm 的降水,排序为:样地Ⅲ>样地Ⅰ>样地Ⅳ>样地Ⅱ。最大持水率同样呈现出随海拔降低先减小后增大的规律。这与田超等^[11]在冀北山地对不同海拔蒙古栎水文效应的研究结果不一致,原因是松山地区枯落物层较厚,分解速率较慢,最大持水量和最大持水率较高所致。

3.2.2 不同海拔枯落物有效拦蓄量 由表 3 可知,4 个海拔梯度油松天然林枯落物的拦蓄能力各不相同。从有效拦蓄率看,未分解层和半分解层呈不同的变化规律。未分解层大小排序为:样地Ⅱ>样地Ⅳ>样地Ⅰ>样地Ⅲ;半分解层则为:样地Ⅳ>样地Ⅲ>样地Ⅰ>样地Ⅱ。这是因为未分解层和半分解层的枯落物层厚度和枯落物储量及吸水速率不同。从有效拦蓄量看,未分解层和半分解层变化规律也不相同。未分解层排序为:样地Ⅲ>样地Ⅳ>样地Ⅰ>样地Ⅱ;半分解层为样地Ⅰ>样地Ⅲ>样地Ⅳ>样地Ⅱ。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Ⅰ(1 211 m)有效拦蓄能力最强,为 46.34 t/hm²,相当于拦蓄 4.63 mm 的降雨;样地Ⅱ(1 012 m)有效拦蓄能力最弱,为 11.04 t/hm²,仅相当于拦蓄 1.10 mm 的降雨,即高海拔拦蓄能力最强,中海拔最弱。这是由于在相对原始的森林中高海拔地区接受阳光较多,加快了枯落物中水分的蒸发速率,使得枯落物能够在较短的时间内再次拦蓄水分而导致高海拔地区枯落物的拦蓄能力较强。

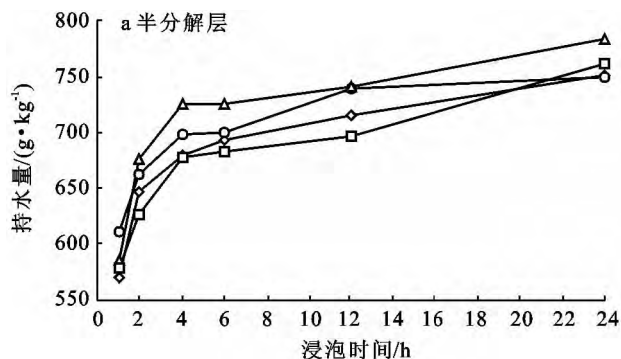
表 3 不同海拔枯落物的拦蓄能力

枯落物层	样地号	枯落物层蓄积量/(t·hm ⁻²)	自然含水率/%	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)	有效拦蓄深/mm
未分解层	Ⅰ	4.31	79.46	158.99	6.85	0.69
	Ⅱ	1.61	16.91	217.53	3.50	0.35
	Ⅲ	7.17	56.83	140.71	10.09	1.01
	Ⅳ	3.52	22.08	209.79	7.38	0.74
半分解层	Ⅰ	23.44	88.54	168.48	39.49	3.95
	Ⅱ	7.42	152.94	101.56	7.54	0.75
	Ⅲ	20.46	136.77	170.13	34.81	3.48
	Ⅳ	20.37	98.81	170.83	34.80	3.48

3.2.3 不同海拔枯落物持水过程 树木枯落物的持水量与其在水中的浸泡时间存在着一定关系。由图 1 可得,未分解层和半分解层在最初浸泡的 2 h 内,持水量迅速上升;之后随着浸泡时间的延长持水量仍呈现出增长的趋势,但增长速度明显变缓;其中未分解

层枯落物浸泡超过 10 h 基本达到饱和状态,而半分解层枯落物在浸泡约 6 h 已基本达到饱和。且在相同浸泡时间内半分解层枯落物持水量总大于未分解层枯落物持水量。表明 4 块样地不同海拔枯落物半分解层持水能力均高于未分解层。这与陈波等^[10]在

冀北山地对不同海拔华北落叶松人工林水文效应的研究结果相反。这是因为研究区气候不一致,在采样时段内本研究区降水较多,湿度较大,枯落物自然含水率远高于冀北地区;且 4 个样地未分解层枯落物蓄积量略低于冀北地区;而半分解层蓄积量远高于冀北地区;大量的半分解层枯落物使得其持水能力远高于未分解层。



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之间存在如下关系:

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

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。拟合的对数曲线相关系数均在 0.93 以上。

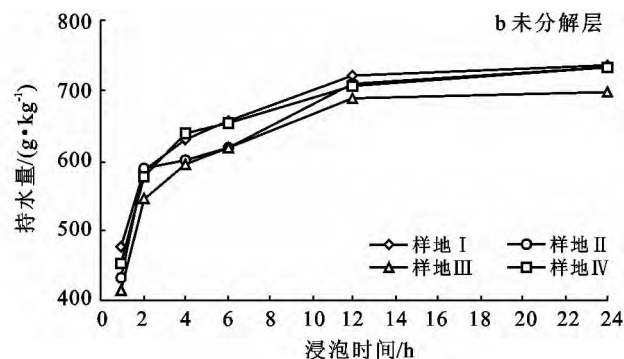


图 1 枯落物不同分解层持水量与浸泡时间的关系

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。未分解层和半分解层枯落物在最初浸泡的 1 h 内吸水速率最大,之后急剧下降,6 h 左右下降速度明显减缓,24 h 左右吸水基本停止。

随浸泡时间的延长,枯落物吸水速率逐渐趋向一致。这主要是因为随着浸泡时间延长,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:

$$V = kt^n [\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})]$$

式中: V ——枯落物吸水速度 ($\text{g}/\text{kg}/\text{h}$); t ——浸泡时间 (h); k ——方程系数; n ——指数。拟合的幂函数曲线相关系数均在 0.99 以上。

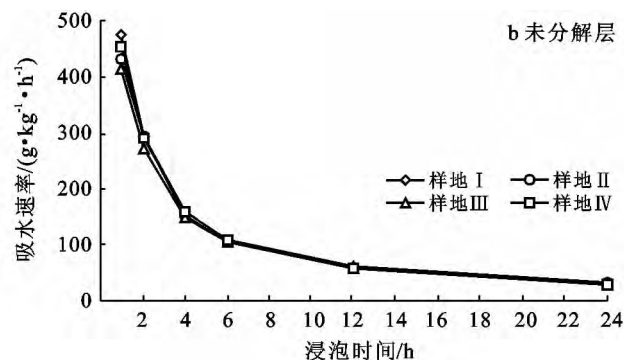
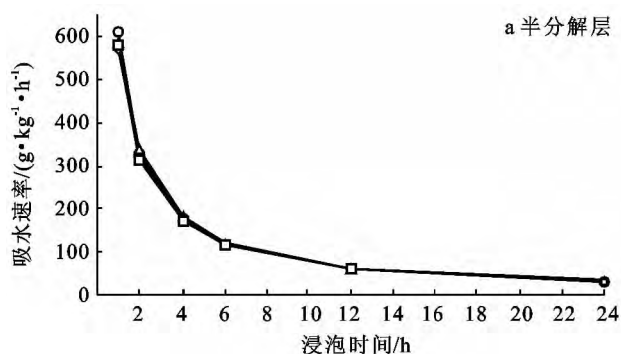


图 2 枯落物不同分解层吸水速率与浸泡时间的关系

3.3 不同海拔土壤水文效应

3.3.1 不同海拔土壤容重 土壤容重越小,土壤疏松多孔,结构性越好,容重大则相反。由表 4 可知,不同样地土壤容重有较大差异。在 0—40 cm 土层内,土壤容重均值排序为:样地 IV > 样地 III > 样地 II > 样地 I,即随海拔升高土壤总容重减小。在容重均值最大的样地 IV 内,容重从 0—10 cm 的 $1.61 \text{ g}/\text{cm}^3$ 增加

到 20—40 cm 的 $1.74 \text{ g}/\text{cm}^3$;在容重均值最小的样地 I 内,容重从 0—10 cm 的 $1.29 \text{ g}/\text{cm}^3$ 增加到 20—40 cm 的 $1.45 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

从土壤容重的垂直变化看,4 个海拔梯度土壤容重变化趋势有相同的规律,即随土壤厚度增加逐渐增大。主要是因为土壤有机质含量随土层深度的增加而逐渐减少,土壤团聚性同样降低,从而增加了土

壤紧实度,进而导致土壤理化性质的差异。这一结果与陈波等^[10]在冀北山地对不同海拔华北落叶松人工林水文效应的研究结果一致,进一步证实了此结论的正确性。

表 4 不同海拔土壤物理性状及持水量

样地号	土壤厚度/ cm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	非毛管 孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	总孔隙度/ %	饱和持水量/ (t·hm ⁻²)	毛管持水量/ (t·hm ⁻²)	有效持水量/ (t·hm ⁻²)
I	0—10	1.29	3.00	30.64	33.64	336.40	306.40	30.00
	10—20	1.41	1.36	27.74	29.10	291.00	277.40	13.60
	20—40	1.45	1.63	26.47	28.10	562.00	529.40	32.60
	均 值	1.38	2.00	28.28	30.28	396.47	371.07	25.40
II	0—10	1.40	3.12	26.24	29.36	293.60	262.40	31.20
	10—20	1.57	1.13	21.90	23.03	230.30	219.00	11.30
	20—40	1.52	1.48	21.37	22.85	457.00	427.40	29.60
	均 值	1.50	1.91	23.17	25.08	326.97	302.93	24.03
III	0—10	1.54	4.78	16.23	21.01	210.10	162.30	47.80
	10—20	1.66	1.50	20.78	22.28	222.80	207.80	15.00
	20—40	1.79	1.86	22.13	23.99	479.80	442.60	37.20
	均 值	1.66	2.71	19.71	22.43	304.23	270.90	33.33
IV	0—10	1.61	2.35	23.95	26.30	263.00	239.50	23.50
	10—20	1.64	1.11	26.84	27.95	279.50	268.40	11.10
	20—40	1.74	3.27	24.80	28.07	561.40	496.00	65.40
	均 值	1.66	2.24	25.20	27.44	367.97	334.63	34.35

3.3.2 不同海拔土壤孔隙度 由表 4 可知,在 0—40 cm 土层内,从 4 个海拔梯度总孔隙度的垂直变化来看,随着土壤厚度的加深样地Ⅲ,Ⅳ增加,样地Ⅰ,Ⅱ减小。说明样地Ⅰ,Ⅱ海拔梯度表层土壤比较疏松;样地Ⅲ土壤的总孔隙度从 0—10 cm 的 21.01% 增加到 20—40 cm 的 23.99%;样地Ⅱ土壤的总孔隙度从 0—10 cm 的 29.36% 减小到 20—40 cm 的 22.85%。土壤总孔隙度均值顺序为:样地Ⅰ>样地Ⅳ>样地Ⅱ>样地Ⅲ,这表明不同海拔土壤总孔隙度变化趋势与土壤容重变化趋势不同,即随海拔升高,总孔隙度先减小而后增大。4 个海拔梯度土壤毛管孔隙度均值排序为:样地Ⅰ>样地Ⅳ>样地Ⅱ>样地Ⅲ。毛管孔隙度值越高,土壤中有效水的存贮量越大,树木用于生长发育的有效水分的比例越大。表明随海拔的降低油松天然林土壤毛管孔隙度先减小后增加,即高海拔(样地Ⅰ 1 211 m)和低海拔(样地Ⅳ 751 m)油松天然林用于自身生长发育所需的有效水分比例大,中海拔则相反。土壤非毛管孔隙度均值排序为:样地Ⅲ>样地Ⅳ>样地Ⅰ>样地Ⅱ。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,即低海拔油松天然林地土壤的通透性最好,涵养水源作用最强。

3.3.3 不同海拔土壤蓄水能力 从表 4 可知,不同海拔土壤蓄水性能存在一定差异。样地Ⅰ,Ⅳ这 2 个

海拔梯度土壤蓄水性能随土层深度的增加呈增加趋势;样地Ⅱ,Ⅲ这 2 个海拔梯度土壤蓄水性能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,其大小顺序为: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 130.32%,即高海拔油松天然林土壤贮蓄水分潜在能力最强,中海拔最弱。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为:样地Ⅳ>样地Ⅲ>样地Ⅱ>样地Ⅰ,样地Ⅳ有效持水量最大,说明中低海拔油松天然林持水能力最强,高海拔最弱。

3.3.4 不同海拔土壤入渗 由图 3 中土壤入渗曲线可以明显看出,4 个海拔梯度初渗速率相差较大。样地Ⅰ初渗速率最大为 60.00 mm/min,样地Ⅱ最小为 11.11 mm/min,两者相差了 5.40 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 1.95~7.06 mm/min,大小排序为:样地Ⅱ>样地Ⅰ>样地Ⅳ>样地Ⅲ。其中样地Ⅲ在 17 min 后达到稳渗,样地Ⅳ在 11 min 后达到稳渗,且入渗速率与入渗时间存在幂函数关系,其关系式如下:

$$y=at^{-b}$$

式中:y——入渗速率(mm/min);a,b——常数;t——入渗时间(min)。拟合的幂函数曲线相关系数均在 0.70 以上。

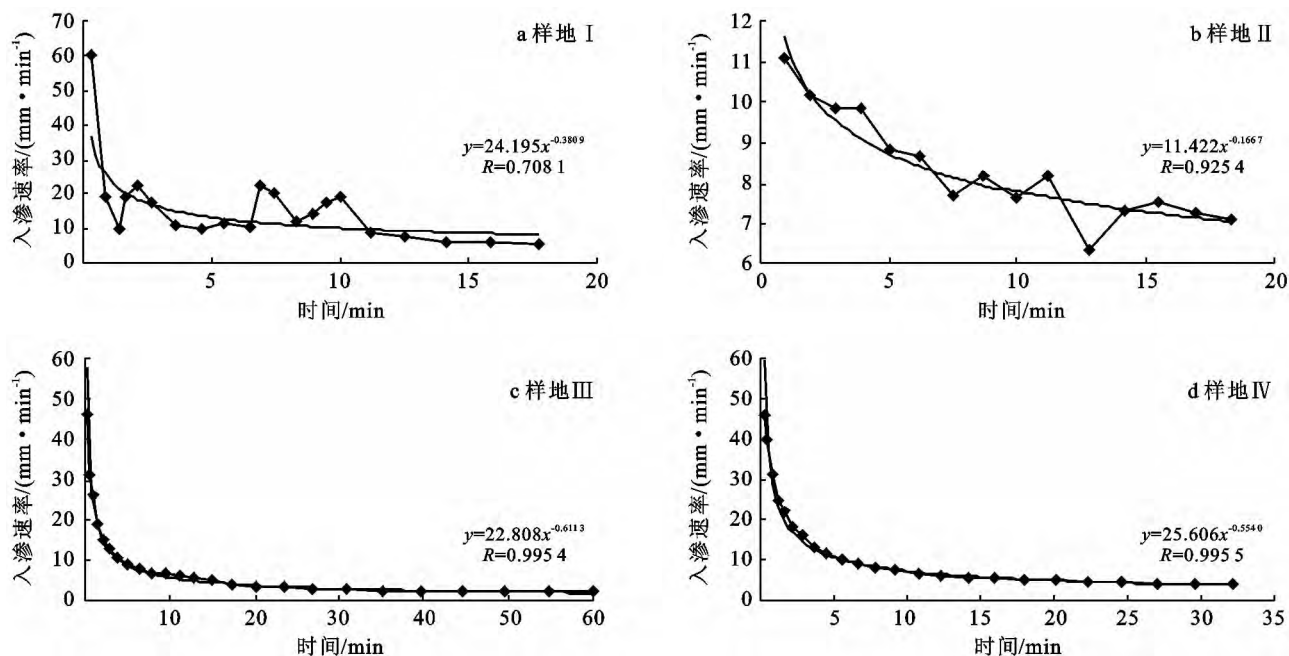


图 3 不同海拔土壤入渗曲线

4 结论

(1) 枯落物总蓄积量排序为:样地 I > 样地 III > 样地 IV > 样地 II, 半分解层蓄积量均大于未分解层蓄积量, 未分解层和半分解层枯落物蓄积量随海拔的降低都呈现出先减小后增大的规律。

(2) 枯落物最大持水量半分解层和未分解层均呈现出随海拔降低先减小后增大的规律, 而最大持水量同样呈现出随海拔降低先减小后增大的规律。

(3) 从枯落物持水过程看, 在最初浸泡的 2 h 内, 枯落物持水量迅速增加, 之后随浸泡时间的延长增加速度逐渐变缓。4 块样地不同海拔枯落物半分解层持水能力均高于未分解层。不同层次枯落物的有效拦蓄率不同, 且未分解层有效拦蓄量随海拔的升高而减小, 半分解层则相反。

(4) 在 0—40 cm 土层, 土壤容重随海拔升高而减小, 且同一海拔土壤容重随土壤厚度的加深而增大, 总孔隙度随海拔升高先减小后增大。

(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, 高海拔油松天然林土壤贮蓄水分潜在能力最强, 中海拔最弱。中低海拔油松天然林持水能力最强, 高海拔最弱。

(6) 4 个海拔梯度初渗速率相差较大, 样地 I 初渗速率最大, 样地 II 最小, 两者相差 5.40 倍。

[参 考 文 献]

[1] Clarke J M, Richards R A, Condon A G. Effect of drought stress on residual transpiration and its relation-

ship with water use of wheat[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1991, 71(3): 695-702.

[2] 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.

[3] 马履一, 李春义, 王希群, 等. 不同强度间伐对北京市山区油松生长及其林下植物多样性的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(5): 1-9.

[4] 雷波, 包维楷, 贾渝, 等. 不同坡向人工林油松幼林下地表苔藓植物层的物种多样性与结构特征[J]. 生态研究, 2004(4): 410-418.

[5] 孙书存, 高贤明, 包维楷, 等. 岷江上游油松造林密度对油松生长和群落结构的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005(1): 8-13.

[6] 张振明, 余新晓, 牛健植, 等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持学报, 2006, 19(3): 139-143.

[7] 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.

[8] 陈东莉, 郭晋平, 杜宁宁. 间伐强度对华北落叶松林下生物多样性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(4): 37-39.

[9] 胡淑萍, 余新晓, 岳永杰. 北京市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.

[10] 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): 1-6.

[11] 田超, 杨新兵, 李军, 等. 冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 221-226.