

太行山典型区域不同林分类型枯落物水文效应

赵鹏¹, 马佳明¹, 李艳茹¹, 马梓琪¹, 谷建才¹, 黄冬梅²

(1.河北农业大学林学院,河北保定 071000;2.河北农业大学理学院,河北保定 071000)

摘要: 采用样地调查和室内浸泡法,对河北易县洪崖山自然保护区葫芦峪林场 6 种不同林分类型枯落物的水文效应进行研究。结果表明:6 种林分类型枯落物的蓄积量范围为 5.25~15.70 t/hm²,蓄积量总体为阔叶林刺槐最大,针阔混交林次之,针叶林最小,各林分半分解层蓄积量总体大于未分解层(油松纯林、黑枣和油松混交林未分解层大于半分解层);最大持水量范围为 10.55~25.04 t/hm²,阔叶林栓皮栎(25.04 t/hm²)最大,刺槐纯林(23.66 t/hm²)次之,针叶林油松(10.55 t/hm²)最小;最大持水率范围是 171.19%~260.20%,针叶林油松最大,侧柏最小;有效拦蓄量范围为 6.25~17.60 t/hm²,阔叶林栓皮栎(17.60 t/hm²)最大,刺槐纯林次之(17.30 t/hm²),针叶林侧柏(6.25 t/hm²)最小;有效拦蓄率略有不同,针叶林油松最大,其值为 180.29%,阔叶林栓皮栎(162.98%)次之,针阔混交林黑枣和油松最小,其值为 77.22%。综合研究分析表明,栓皮栎和刺槐的枯落物层持水能力较佳,该地区栓皮栎林和刺槐林枯落物层水源涵养能力优于其他 4 种林分类型的枯落物。

关键词: 太行山; 枯落物; 水文效应; 不同林分

中图分类号:S715

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0176-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.025

Hydrological Effects of Litter in Different Forest Types in the Typical Areas of Taihang Mountains

ZHAO Peng¹, MA Jiaming¹, LI Yanru¹, MA Ziqi¹, GU Jiancai¹, HUANG Dongmei²

(1.College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000;

2.College of Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: The soil sample survey and indoor soaking method were used to study the hydrological effects of six different stand types in Huluyu Forest Farm, Hongya mountain nature reserve, Yixian County, Hebei Province. The results showed that the accumulations of litter in 6 stand types ranged from 5.25 to 15.70 t/hm², and the accumulations were the largest in broad-leaved *Robinia pseudoacacia*, followed by mixed needle-width forest, and the smallest in coniferous forest. The total volume of semi-decomposed layer of each forest was larger than that of non-decomposed layer (the non-decomposed layer of pure *Pinus tabulaeformis*, *Diospyros Iotus* and *Pinus tabulaeformis* mixed forest was larger than that of semi-decomposed layer). The maximum water capacity range was 10.55 ~ 25.04 t/hm², among which *Quercus variabilis* (25.04 t/hm²) was the largest, *Robinia pseudoacacia* (23.66 t/hm²) was the second largest, and *Pinus tabuliformis* (10.55 t/hm²) was the smallest. The range of maximum water holding rate was 171.19% ~ 260.20%, among which *Pinus tabulaeformis* of coniferous forest was the largest and *Platycladus orientalis* was the smallest. The range of effective storage was 6.25 ~ 17.60 t/hm², among which *Quercus variabilis* (17.60 t/hm²) was the largest in broad-leaved forest, *Robinia pseudoacacia* (17.30 t/hm²) was the second largest, *Platycladus orientalis* (6.25 t/hm²) was the smallest. The effective retention rates were slightly different. The coniferous *Pinus tabuliformis* forest was the largest with the value of 180.29%, followed by the broad-leaved *Quercus variabilis* forest (162.98%), the needle and broad mixed forest *Diospyros Iotus* and *Pinus tabulaeformis*

收稿日期:2020-02-17

资助项目:流域综合经营技术研究与示范项目(1905005);国家重点研发计划项目(2016YFC0500802);2015年河北省高等学校科学研究计划项目(Z2015079)

第一作者:赵鹏(1992—),男,河北蔚县人,在读硕士研究生,主要从事森林可持续经营研究。E-mail:237965849@qq.com

通信作者:黄冬梅(1963—),女,河北南皮人,硕士,教授,主要从事森林资源资产评估研究。E-mail:huanghdm@qq.com

谷建才(1963—),男,河北藁城人,博士,教授,主要从事森林可持续经营、森林资源资产评估研究。E-mail:gujiancai@126.com

was the smallest with the value of 77.22%. The comprehensive analysis showed that the water holding capacity of the litter layer of *Quercus variabilis* and *robinia pseudoacacia* was better than those of the litter layer of other four stand types.

Keywords: Taihang Mountain; litter; hydrological effects; different forest stands

枯落物是生态系统的重要组成部分。它是森林生态系统在自然演替中产生的物质并归还到林地表面,主要包括林木及林下植被凋落的树皮、枯枝、繁殖器官、枯叶、野生动物的残骸及其代谢产物、枯死的草本和树根等^[1]。它在森林水文调节方面发挥着重要的功能,能够控制水土流失,其水文作用主要表现在枯落物的持水方面,其持水量的多少与林地现存量、分解状况及自身的含水量、天气状况等诸多因素存在着某种关联^[2]。枯落物层作为森林水文作用的重要功能层之一,在减弱雨水对地表土壤冲刷、减缓地表径流、防止土壤侵蚀、抑制土壤水分过快蒸发等方面发挥着重要作用,是森林防止水土流失和水源涵养的重要功能层^[3]。国内外专家学者对森林枯落物在不同区域、不同森林类型植被下的持水能力做了较多的研究,在枯落物的分解速率、蓄积量、土壤侵蚀、影响地表径流等方面取得了一定的成果。Freschet等^[4]对枯落物的持水性能进行了研究发现枯落物对土壤的理化性质有一定的影响。Gholami等^[5]还对枯落物的阻流减沙作用进行了研究。兰亚男等^[6]认为,不同林分类型的枯落物持水量与浸水时间呈对数函数关系,持水速率与浸水时间呈幂函数关系。庞梦丽等^[7]认为,太行山3种不同的水土保持林在枯落物储量和最大持水量等方面均大于荒坡且枯落物持水量、吸水速率均与浸泡时间呈对数和幂函数关系。王会京等^[8]认为,太行山不同林型半分解层和未分解层最大持水量(率)、有效拦蓄量(率)和自然含水量随海拔的增加而增加。宣立辉等^[9]认为,4种不同的林分类型在最大持水量(率)方面杨树阔叶混交林表现最优。目前对于涵养水源问题的研究发现,枯落物层调节降水能力可观。

由于太行山是首都、雄安新区乃至京津冀地区重要的生态屏障区,地理位置极其重要,但生态环境又极其脆弱,人类活动干扰较为严重,土壤层瘠薄,植被覆盖面积较小,水土流失较严重,旱涝灾害频发,所以研究太行山不同林分的水文效应极其重要。但目前对于太行山典型区域油松纯林、侧柏纯林、刺槐纯林、栓皮栎纯林、侧柏栓皮栎混交林、黑枣油松混交林6种林分枯落物水文效应研究相对较少。本文选取洪崖山自然保护区葫芦峪林场6种典型林分,对其林下枯落物持水能力进行研究,分析太行山枯落物层的水文效应,以此来揭示6种不同林分类型枯落物的水源涵养能力,为该地区的森林经营以及更好的发挥生

态屏障功能和生态环境的保护提供理论支撑。

1 研究区概况

太行山脉地理坐标为北纬 $34^{\circ}34'$ — $40^{\circ}43'$,东经 $110^{\circ}14'$ — $114^{\circ}33'$,总体呈现出北高南低,绵延400余公里。太行山属暖温带半湿润大陆性季风气候,全年冬无严寒,夏无酷暑,雨热同季,虽四季分明,但冬长夏短。太行山年平均气温在 10°C 左右,1月最冷,平均最低气温在 -10°C 左右;7月最热,平均最高气温在 28°C 上下,太行山年降水量534 mm左右,7月降水最多,为132.3 mm,12月最少,为4.4 mm。本研究区域选取太行山的洪崖山自然保护区葫芦峪林场,位于河北易县境内,太行山北端东麓。地理坐标东经 $114^{\circ}51'$ — $115^{\circ}37'$,北纬 $39^{\circ}02'$ — $39^{\circ}35'$,平均海拔324 m,地势由西向东下降明显,流水落差大,易患水灾,山体多为侵蚀、剥蚀、岩溶地貌。易县属温带季风气候区,春秋干旱多风,夏季炎热多雨,春季平均气温 3.2°C ,夏季平均气温 32.2°C ,秋季平均气温 -3.3°C ,全年极端最低气温 -23°C ,极端最高气温 41°C 。冬季严寒少雪,四季分明。该区主要为片麻岩山区,土壤主要为褐土,主要乔木树种为油松(*Pinus tabulaeformis* Carr)、侧柏(*Platycladus orientalis* (Linn.))、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)等,灌木主要以荆条(*Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow)等为主,草本层主要为线叶蒿(*Artemisia subulata* Nakai)、狭裂太行铁线莲(*Clematis kirilowii* var. *chanetii* (Levl.) Hand.-Mazz)、大叶铁线莲(*Clematis heracleifolia* DC)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)等。

2 研究方法

2.1 样地调查

在前期样地踏查的基础上,于2019年7月中旬至下旬在河北省易县洪崖山自然保护区葫芦峪林场展开试验样地调查。在研究区域内选择油松纯林、侧柏纯林、刺槐纯林、栓皮栎纯林、侧柏栓皮栎混交林、黑枣油松混交林6种典型的林分类型,在6种不同的林分中分别设置 $20\text{ m}\times 30\text{ m}$ 标准地,每个林分设置3块标准地,记录海拔、坡向、坡度等基本样地信息,并对林木进行每木检尺测量其胸径,同时测量其树高、冠幅等因子,进行详细记录。各样地基本调查信

息见表 1。

2.2 枯落物蓄积量及持水量的测定

在每块标准地内均匀的选取 3 个 $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的样方,按照枯落物的未分解层和半分解层来测量其

厚度并记录,随即装入塑封袋中,带回实验室用电子天平称其鲜重并装入档案袋,放入 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中,烘至恒重,称其干重,以此可以计算单位面积的蓄积量和自然含水率。

表 1 研究区样地基本信息

林地编号	主要树种	海拔/m	坡度/ $^\circ$	坡向	东径	北纬	郁闭度	平均胸径/cm	平均树高/m	平均冠幅/m	平均枝下高/m
I	刺槐	217	15	西	$115^\circ 36' 58''$	$39^\circ 25' 27''$	0.5	12.4	6.7	3.7	3.4
II	侧柏、栓皮栎	214	17	东	$115^\circ 30' 31''$	$39^\circ 28' 57''$	0.6	14.5	8.0	2.8	4.6
III	栓皮栎	217	16	西	$115^\circ 36' 07''$	$39^\circ 27' 35''$	0.6	17.6	10.8	3.0	5.8
IV	油松	215	18	南	$115^\circ 30' 40''$	$39^\circ 28' 45''$	0.7	22.9	10.0	6.3	5.0
V	侧柏	222	15	西南	$115^\circ 30' 27''$	$39^\circ 29' 29''$	0.7	15.5	8.9	3.2	6.4
VI	黑枣、油松	230	17	南	$115^\circ 30' 37''$	$39^\circ 28' 53''$	0.8	16.5	10.6	4.8	5.9

采用室内浸泡法可以测定不同林分枯落物的持水量及持水速率^[10]。将烘干后的枯落物浸入水中,分别测定其 0.25,0.5,1,2,4,6,8,10,12,24 h 重量变化情况,每次在自然状态下不滴水为标准,进行称重,对其吸水过程进行研究。根据计算公式^[11]可以测定枯落物各项吸水指标:

$$K = (n_1 - n_2) / n_2 \times 100\% \quad (1)$$

$$H = (n_3 - n_2) / n_2 \times 100\% \quad (2)$$

$$W_m = (R_m - R_0) \times M \quad (3)$$

$$W = (0.85 R_m - R_0) \times M \quad (4)$$

式中: K 为枯落物自然含水率(%); n_1 为样品鲜重(g); n_2 为样品干重(g); H 为最大持水率(%); n_3 为样品浸水 24 h 后的质量(g); W_m 为枯落物最大拦蓄量(t/hm^2); W 为枯落物有效拦蓄量(t/hm^2); R_m 为最大持水率(%); R_0 为平均自然含水率(%); M 为枯落物蓄积量(t/hm^2)。

2.3 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2003 软件和 SPSS 21 软件对数据进行统计分析和绘图。采用单因素方差分析和最小显著法检验组间差异性。通过拟合枯落物的持

水量与时间的多元回归关系得到拟合度参数 R^2 。

3 结果与分析

3.1 不同林分类型枯落物蓄积量差异性分析

枯落物蓄积量或者称为现存量,不同树种的林地和起源,在很大程度上影响着枯落物的输入量,而林地的立地条件、人为活动等因素都与枯落物的蓄积量直接相关^[12]。由表 2 可知,不同林分类型枯落物总厚度从大到小依次为栓皮栎>侧柏和栓皮栎混交林>侧柏=黑枣和油松混交林>刺槐>油松,其厚度的变化范围为 1.0~4.0 cm,栓皮栎的厚度最大为 4.0 cm,油松的厚度最小为 1.0 cm;未分解层厚度的变化范围 0.5~2.4 cm,栓皮栎的厚度最大为 2.4 cm,刺槐的厚度最小为 0.5 cm,半分解层厚度的变化范围 0.3~1.6 cm,栓皮栎的厚度最大为 1.6 cm,油松的厚度最小为 0.3 cm;最小显著法(LSD)分析表明,栓皮栎枯落物总厚度与其他 5 种林分类型枯落物总厚度差异性显著,未分解层栓皮栎的厚度也与其他 5 种林分类型枯落物厚度差异性显著,半分解层栓皮栎厚度与刺槐、侧柏和栓皮栎混交林、油松、黑枣和油松混交林枯落物厚度差异性显著。

表 2 不同林分类型枯落物蓄积量

林分类型	未分解层			半分解层			枯落物总蓄积量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	枯落物 总厚度/cm
	厚度/ cm	蓄积量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	占总量/ %	厚度/ cm	蓄积量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	占总量/ %		
刺槐纯林	$0.5 \pm 0.2\text{b}$	$3.85 \pm 2.20\text{a}$	24.54	$0.7 \pm 0\text{b}$	$11.85 \pm 2.40\text{a}$	75.46	$15.70 \pm 5.44\text{a}$	$1.2 \pm 0.3\text{b}$
侧柏和栓皮栎混交林	$1.2 \pm 0.6\text{b}$	$2.09 \pm 0.34\text{a}$	18.20	$0.7 \pm 0.6\text{b}$	$9.41 \pm 1.13\text{ab}$	81.80	$11.50 \pm 1.48\text{ab}$	$1.9 \pm 1.5\text{b}$
栓皮栎纯林	$2.4 \pm 0.4\text{a}$	$3.87 \pm 0.86\text{a}$	35.72	$1.6 \pm 0.7\text{a}$	$6.96 \pm 3.30\text{bc}$	64.28	$10.83 \pm 5.07\text{ac}$	$4.0 \pm 1.3\text{a}$
油松纯林	$0.7 \pm 0.2\text{b}$	$3.29 \pm 1.82\text{a}$	62.69	$0.3 \pm 0\text{b}$	$1.96 \pm 0.89\text{d}$	37.31	$5.25 \pm 2.96\text{bcd}$	$1.0 \pm 0.3\text{b}$
侧柏纯林	$0.8 \pm 0.2\text{b}$	$2.71 \pm 1.54\text{a}$	39.50	$0.8 \pm 0.2\text{ab}$	$4.15 \pm 2.10\text{cd}$	60.50	$6.86 \pm 4.31\text{bce}$	$1.6 \pm 0.6\text{b}$
黑枣和油松混交林	$1.1 \pm 0.7\text{b}$	$6.07 \pm 3.17\text{a}$	62.28	$0.5 \pm 0\text{b}$	$3.68 \pm 0.16\text{cd}$	37.72	$9.75 \pm 3.81\text{ade}$	$1.6 \pm 0.8\text{b}$

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同林分各指标之间的差异性($P < 0.05$)。

6 种不同林分类型的枯落物蓄积量有一定的差异性,分析不同林分类型枯落物蓄积量可知,其变化范围 $5.25 \sim 15.70 \text{ t}/\text{hm}^2$,刺槐的枯落物总蓄积量最大为 $15.7 \text{ t}/\text{hm}^2$,半分解层占总量 75.46%,未分解层

占总量 24.54%,油松的枯落物总蓄积量最小为 $5.25 \text{ t}/\text{hm}^2$,半分解层占总量 37.31%,未分解层占总量的 62.69%;在未分解层中,油松所占比例最大,占总蓄积量的 62.69%,侧柏和栓皮栎混交林所占比例最小,

占总蓄积量 18.20%，在半分解层中，侧柏和栓皮栎混交林蓄积量所占比例最大 81.80%，油松所占比例最小，占总蓄积量的 37.31%；

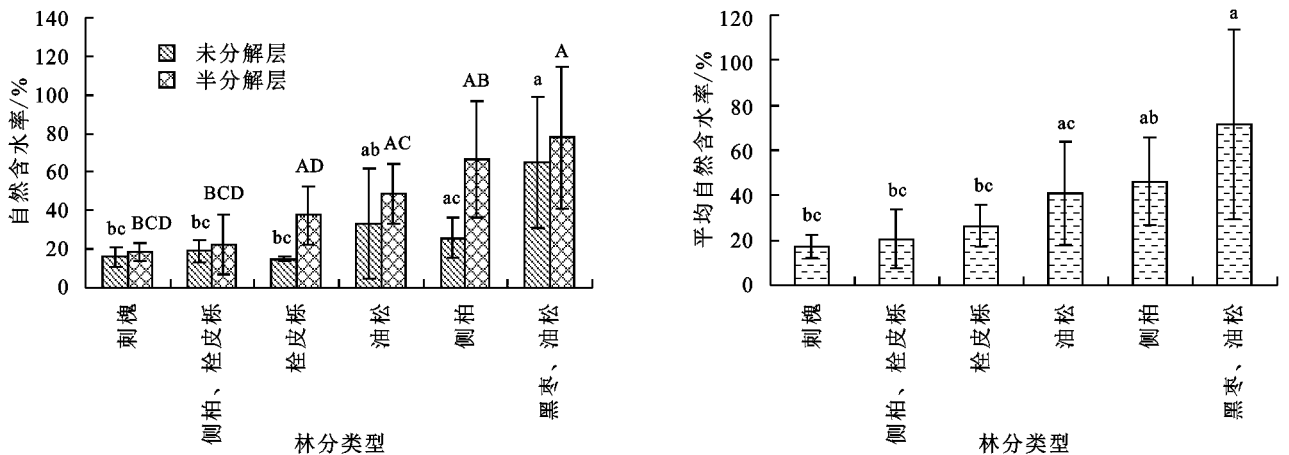
蓄积量大小排序为刺槐>侧柏和栓皮栎混交林>栓皮栎>黑枣和油松混交林>侧柏>油松；最小显著法(LSD)分析表明，刺槐与油松和侧柏枯落物总蓄积量差异性显著，其他林分之间枯落物总蓄积量显著性差异不明显，在未分解层中 6 种不同林分类型枯落物蓄积量差异性不明显，在半分解层中刺槐与油松、侧柏、黑枣和油松混交林枯落物蓄积量差异性显著，侧柏和栓皮栎混交林与油松、侧柏、黑枣和油松混交林枯落物蓄积量差异性显著，栓皮栎和油松枯落物蓄积量差异性显著。

3.2 不同林分类型枯落物持水能力分析

3.2.1 不同林分类型枯落物持水性能 枯落物的自然含水率是指枯落物从样地内采集回实验室后，称重测得的枯落物鲜重，经过烘干使枯落物恒重，称得干重，二者比值所得结果。由图 1 可知，不同林分类型未分解层自然含水率为 15.04%~65.26%，栓皮栎纯林的自然含水率最小，黑枣和油松混交林自然含水率最大，自然含水率的大小依次为黑枣和油松混交林(65.26%)>油松纯林(33.19%)>侧柏纯林

(25.78%)>侧柏和栓皮栎混交林(18.99%)>刺槐纯林(15.99%)>栓皮栎纯林(15.04%)，经 LSD 差异性分析，黑枣和油松混交林与刺槐纯林、侧柏和栓皮栎混交林、栓皮栎纯林差异性显著，与其他林分无显著性差异，其他林分之间差异性不显著；半分解层自然含水率为 18.86%~77.74%，其中刺槐纯林的自然含水率最小，黑枣和油松混交林自然含水率最大，自然含水率的大小排序依次为黑枣和油松混交林(77.74%)>侧柏纯林(66.53%)>油松纯林(48.56%)>栓皮栎纯林(37.73%)>侧柏和栓皮栎混交林(22.41%)>刺槐纯林(18.86%)，经 LSD 差异性分析，黑枣和油松混交林与刺槐纯林、侧柏和栓皮栎混交林差异性显著，其他林分之间差异性不显著。

由图 1 可知，枯落物层的自然含水率为 17.42%~71.50%，其中黑枣和油松混交林的自然含水率最大，刺槐纯林的自然含水率最小，从大到小依次为黑枣和油松混交林(71.50%)>侧柏纯林(46.16%)>油松纯林(40.87%)>栓皮栎纯林(26.39%)>侧柏和栓皮栎混交林(20.70%)>刺槐纯林(17.42%)，经 LSD 差异性分析，黑枣和油松混交林与刺槐纯林、侧柏和栓皮栎混交林、栓皮栎纯林差异性显著，其他林分之间无显著性差异。



注:图柱上方不同小写字母表示不同林分类型未分解层和枯落物层间差异性显著($P < 0.05$)；不同大写字母不同林分类型半分解层间差异性显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同林分类型未分解层和半分解层自然含水率以及枯落物层平均自然含水率

枯落物层能够保护土壤避免受到雨水的冲刷，同时增加土壤的腐殖质和有机质，更好地增加土壤的孔隙度。枯落物层持水量一般能达到自身干重的 2~4 倍，但是由于森林类型、枯落物的存有量等差异，造成最大持水量、最大持水率的差异性。枯落物层持水量随着枯落物接触雨量的增加而增加，达到一个定值，枯落物的持水量不再变化，此时为枯落物的最大持水量^[13]。

由图 2 可知，不同林分类型枯落物未分解层最大持水量变化范围为 4.11~10.82 t/hm²，黑枣和油松混交林

最大，其持水量为 10.82 t/hm²，油松纯林最小，其持水量为 4.11 t/hm²，其大小依次为黑枣和油松混交林(10.82 t/hm²)>栓皮栎纯林(8.14 t/hm²)>刺槐纯林(7.40 t/hm²)>侧柏纯林(4.95 t/hm²)>侧柏和栓皮栎混交林(4.76 t/hm²)>油松纯林(4.11 t/hm²)，

油松纯林与其他林分最大持水量有显著性差异，其他林分之间无显著性差异；最大持水率变化范围为 162.14%~244.29%，油松纯林最大持水率最小，其持水率为 162.14%，侧柏和栓皮栎混交林的最大持水率最大，其最大持水率为 244.29%，大小依次为侧柏和

栓皮栎混交林(244.29%)>栓皮栎纯林(214.55%)>刺槐纯林(212.43%)>黑枣和油松混交林(180.54%)>侧柏纯林(177.89%)>油松纯林(162.14%)，不同林分未分解层最大持水率无显著性差异。

由图 2 可知,不同林分类型枯落物半分解层最大持水量变化范围为 6.16~16.90 t/hm²,黑枣和油松混交林最小,其持水量为 6.16 t/hm²,栓皮栎纯林最大,其持水量为 16.90 t/hm²,其大小依次为栓皮栎纯林(16.90 t/hm²)>刺槐纯林(16.26 t/hm²)>侧柏和栓皮栎混交林(15.44 t/hm²)>侧柏纯林(6.98 t/hm²)

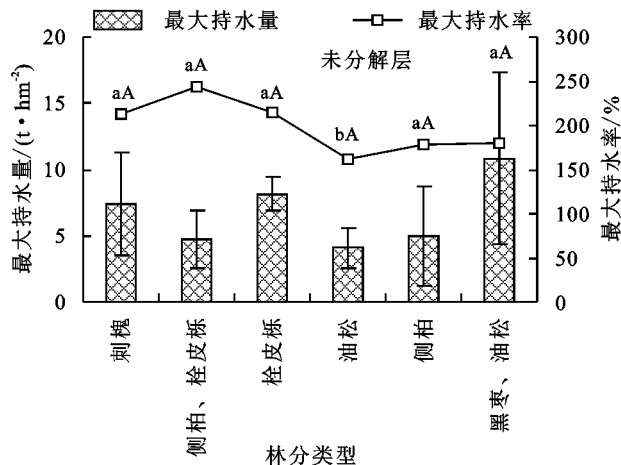


图 2 不同林分类型枯落物未分解层和半分解层最大持水量与持水率

由图 3 可知,不同林分类型枯落物总最大持水量变化范围为 10.55~25.04 t/hm²,油松纯林的枯落物最大持水量最小,其持水量为 10.55 t/hm²,栓皮栎纯林的最大持水量最大,其持水量为 25.04 t/hm²,其大小依次为栓皮栎纯林(25.04 t/hm²)>刺槐纯林(23.66 t/hm²)>侧柏和栓皮栎混交林(20.21 t/hm²)>黑枣和油松混交林(16.99 t/hm²)>侧柏纯林(11.93 t/hm²)>油松纯林(10.55 t/hm²);平均最大持水率变化范围为 171.19%~260.20%,侧柏纯林的平均最大持水率最小,其持水率为 171.19%,油松纯林的平均最大持水率最大,其持水率 260.20%,平均最大持水率表现为油松纯林(260.20%)>栓皮栎纯林(222.78%)>侧柏和栓皮栎混交林(203.04%)>刺槐纯林(176.82%)>黑枣和油松混交林(174.96%)>侧柏纯林(171.19%);总最大持水量和平均最大持水率各林分之间无显著性差异。

3.2.2 不同林分类型枯落物持水过程 枯落物未分解层是指大致保留原状及质地的枯枝落叶,而半分解层是指还未全部腐败、人眼可分辨其大体形状的枯枝落叶^[7]。持水量反映不同林分类型、不同分解层下枯落物的持水能力,不同时间点下对应枯落物的不同持水量。随着浸泡时间的增加,其未分解层和半分解层枯落物的持水量变化趋势一致。

由图 4 可知,不同林分类型未分解层的枯落物持

>油松纯林(6.43 t/hm²)>黑枣和油松混交林(6.16 t/hm²),各林分之间无显著性差异;最大持水率变化范围为 141.21%~358.26%,油松纯林最大持水率最大,其持水率为 358.26%,刺槐纯林的最大持水率最小,其最大持水率为 141.21%,大小依次为油松纯林(358.26%)>栓皮栎纯林(231.02%)>黑枣和油松混交林(169.39%)>侧柏纯林(164.49%)>侧柏和栓皮栎混交林(161.78%)>刺槐纯林(141.21%),油松纯林与其他林分类型枯落物半分解层最大持水率有显著性差异,其他林分之间差异性不显著。

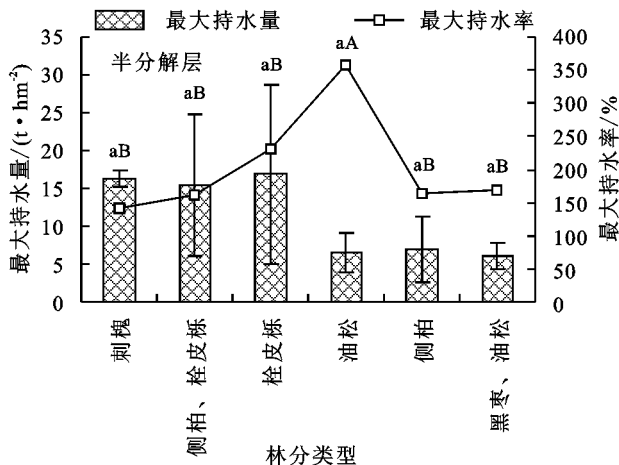


图 3 不同林分类型枯落物总最大持水量和持水率

水量总体呈增长趋势,在前 2 h 6 种不同林分类型枯落物随着浸泡时间的增加持水量增长较快,分别从初始持水量的 1 152.74, 1 014.08, 971.15, 969.80, 776.25, 629.50 g/kg 增长到 1 516.47, 1 229.19, 1 700.20, 1 305.54, 1 376.19, 992.50 g/kg, 2 h 之后持水量增长减缓,直至 24 h 持水量基本达到饱和状态,不再发生变化,从初始持水量可以看出刺槐纯林(1 152.74 g/kg)>侧柏纯林(1 014.08 g/kg)>栓皮栎纯林(971.15 g/kg)>黑枣和油松混交林(969.80 g/kg)>侧柏和栓皮栎混交林(776.25 g/kg)>油松纯林(629.50 g/kg)。

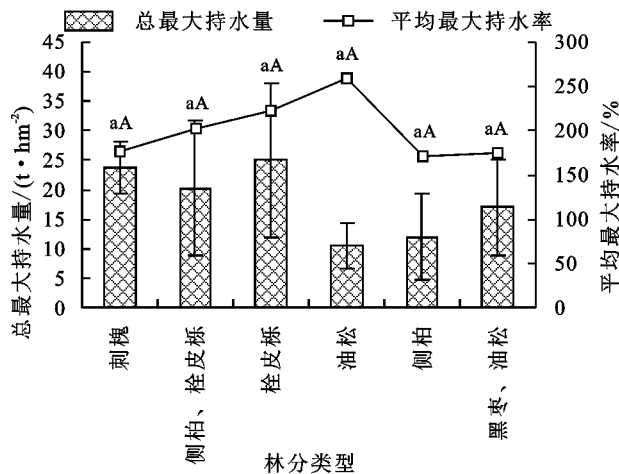


图 4 不同林分类型半分解层的枯落物持水率

由图 4 可知,不同林分类型半分解层的枯落物持水量总体呈增长趋势,前 2 h 6 种不同林分类型枯落

物随着浸水时间的增加其持水量增长较快,分别从初始持水量 1 266.08, 1 245.22, 1 210.78, 1 209.16, 1 203.95, 1 087.81 g/kg 增加到 1 759.07, 1 376.58, 1 410.06, 1 299.01, 2 288.68, 1 396.57 g/kg, 在 2 h 之后其持水量增长趋于平缓。直至 24 h 持水量基本

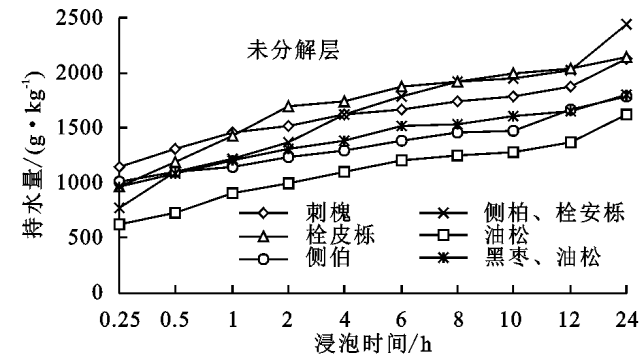


图 4 不同林分类型未分解层和半分解层持水量与浸水时间的关系

依据已有学者^[6,9,14-15]对不同分解层下持水量增长模型和拟合方程的研究成果,对图 4 中的未分解层和半分解层在 0~24 h 内持水量增长曲线进行回归分析,可得 0~24 h 模型(1),对不同林分类型的不同分解层持水量进行拟合所得的关系式见表 3。

$$E = a \ln t + b \quad (1)$$

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

表 3 枯落物持水量与浸水时间的关系

枯落物层	林分类型	拟合方程	相关系数 R^2
未分解层	刺槐纯林	$E = 185.52 \ln t + 1407.6$	0.9562
	侧柏和栓皮栎混交林	$E = 333.18 \ln t + 1224.9$	0.9769
	栓皮栎纯林	$E = 258.24 \ln t + 1393.8$	0.9798
	油松纯林	$E = 199.51 \ln t + 870.02$	0.9715
	侧柏纯林	$E = 158.29 \ln t + 1167.2$	0.9097
	黑枣和油松混交林	$E = 177.35 \ln t + 1196.9$	0.9884
半分解层	刺槐纯林	$E = 39.582 \ln t + 1267.2$	0.9642
	侧柏和栓皮栎混交林	$E = 96.832 \ln t + 1309.6$	0.9040
	栓皮栎纯林	$E = 214.56 \ln t + 1587.3$	0.9853
	油松纯林	$E = 388.55 \ln t + 1978.1$	0.8727
	侧柏纯林	$E = 87.435 \ln t + 1334.3$	0.9478
	黑枣和油松混交林	$E = 94.594 \ln t + 1353.4$	0.9476

注: E 为枯落物持水量(g/kg); t 为浸泡时间(h)。

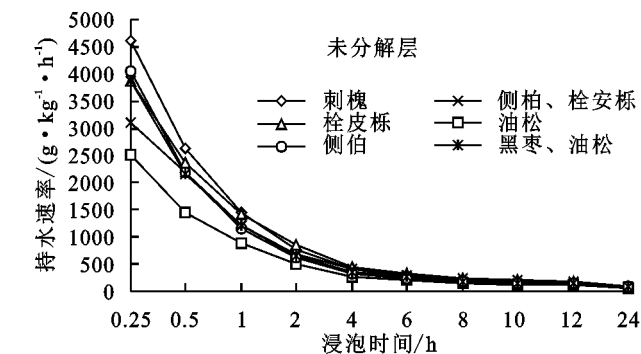
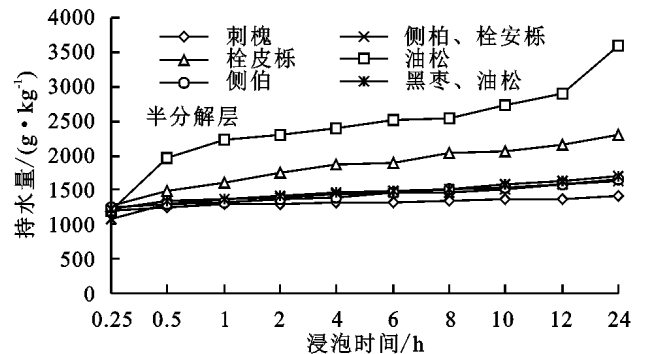
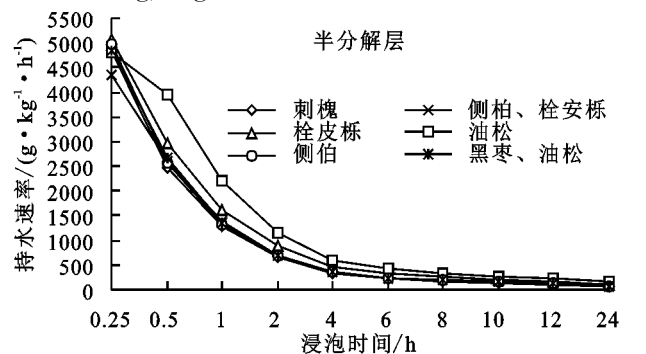


图 5 不同林分类型未分解层和半分解层持水速率与浸水时间的关系

不变,达到饱和状态,其初始持水量表现为栓皮栎纯林(1 266.08 g/kg) > 侧柏纯林(1 245.22 g/kg) > 黑枣和油松纯林(1 210.78 g/kg) > 刺槐纯林(1 209.16 g/kg) > 油松纯林(1 203.95 g/kg) > 侧柏和栓皮栎混交林(1 087.81 g/kg)。



持水速率与枯落物本身的干燥程度,浸泡时间有着一定的关系。枯落物的持水量与持水速率是反映枯落物持水过程的重要指标,持水速率越大反映枯落物在某段时间吸收水量越大,能够在一定程度上减小地表径流,从而减少水土流失,起到固土保肥的作用^[16]。由图 5 可知,不同林分类型的未分解层枯落物持水速率总体呈下降趋势,在前 2 h 下降速度明显,2~4 h 下降速度减缓,4~24 h 持水速率逐步趋于平衡,其初始速率的大小为:刺槐纯林(4 610.97 g/(kg·h)) > 侧柏纯林(4 056.32 g/(kg·h)) > 栓皮栎(3 884.61 g/(kg·h)) > 黑枣和油松混交林(3 879.20 g/(kg·h)) > 侧柏和栓皮栎混交林(3 105.01 g/(kg·h)) > 油松纯林(2 518.01 g/(kg·h))。不同林分类型的半分解层枯落物持水速率总体呈下降趋势,在前 2 h 下降速度明显,2~4 h 下降速度减缓,4~24 h 持水速率逐步趋于平衡,其初始速率的大小为刺槐纯林(4 610.97 g/(kg·h)) > 侧柏纯林(4 056.32 g/(kg·h)) > 栓皮栎(3 884.61 g/(kg·h)) > 黑枣和油松混交林(3 879.20 g/(kg·h)) > 侧柏和栓皮栎混交林(3 105.01 g/(kg·h)) > 油松纯林(2 518.01 g/(kg·h))。



依据已有学者^[6,9,14-15]对不同分解层下持水速率随时间变化关系所得模型及拟合方程,对图 5 中不同

依据已有学者^[6,9,14-15]对不同分解层下持水速率

随时间变化关系所得模型及拟合方程,对图 5 中不同

林分类型半分解层和未分解层 0~24 h 枯落物持水速率变化曲线进行的回归分析,可得 0~24 h 模型(2),各不同林分的不同分解层持水速率变化曲线拟合关系式见表 4。

$$V = kt^n \quad (2)$$

式中: V 为枯落物持水速率($g/(kg \cdot h)$); k 为方程系数; t 为枯落物浸泡时间(h); n 为指数。

表 4 枯落物持水速率与浸水时间的关系

枯落物层	林分类型	拟合方程	相关系数 R^2
未分解层	刺槐纯林	$V = 1394.9t^{-0.882}$	0.9995
	侧柏和栓皮栎混交林	$V = 1175.6t^{-0.771}$	0.9983
	栓皮栎纯林	$V = 1352.1t^{-0.83}$	0.9977
	油松纯林	$V = 846.82t^{-0.805}$	0.9994
	侧柏纯林	$V = 1159.7t^{-0.881}$	0.9990
	黑枣和油松混交林	$V = 1182.2t^{-0.867}$	0.9999
半分解层	刺槐纯林	$V = 1266.5t^{-0.97}$	1.0000
	侧柏和栓皮栎混交林	$V = 1301.7t^{-0.929}$	0.9992
	栓皮栎纯林	$V = 1568.4t^{-0.877}$	0.9996
	油松纯林	$V = 1911.1t^{-0.823}$	0.9917
	侧柏纯林	$V = 1331.9t^{-0.939}$	0.9998
	黑枣和油松混交林	$V = 1349.7t^{-0.934}$	0.9998

注: V 为枯落物持水速率($g/(kg \cdot h)$); t 为枯落物浸泡时间(h)。

3.3 不同林分类型枯落物拦蓄性能分析

拦蓄量和拦蓄率是反映枯落物对保护土壤和持水能力的重要指标,但最大拦蓄量和最大拦蓄率对降雨的实际拦蓄情况反映偏大,不能较准确地反映其拦蓄情况^[17]。有研究^[18]表明,当降雨在 20~30 mm 之后,无论其枯落物的含水量达到何种情况,有效拦蓄率和有效拦蓄量只能达到最大拦蓄率和最大拦蓄量

的 0.85,因此一般采用有效拦蓄量和有效拦蓄率来反应枯落物的实际拦蓄情况和效果。

由图 6 可知,枯落物未分解层最大拦蓄量范围为 3.53~7.57 t/hm^2 ,不同林分之间最大拦蓄量没有显著性差异,最大拦蓄量之间的大小依次是栓皮栎纯林(7.57 t/hm^2)>刺槐纯林(6.88 t/hm^2)>黑枣和油松混交林(6.01 t/hm^2)>侧柏和栓皮栎混交林(4.38 t/hm^2)>侧柏纯林(4.09 t/hm^2)>油松纯林(3.53 t/hm^2);枯落物的半分解层最大拦蓄量范围为 3.36~13.97 t/hm^2 ,半分解层中侧柏纯林、黑枣和油松混交林与刺槐纯林、侧柏和栓皮栎混交林以及栓皮栎纯林之间差异性显著,与油松纯林差异性不显著,其他林分之间没有显著性差异,最大拦蓄量表明刺槐纯林(13.97 t/hm^2)>栓皮栎纯林(13.79 t/hm^2)>侧柏和栓皮栎混交林(13.23 t/hm^2)>油松纯林(5.61 t/hm^2)>侧柏纯林(3.95 t/hm^2)>黑枣和油松混交林(3.36 t/hm^2)。

由图 6 可知,枯落物未分解层最大拦蓄率范围为 115.27%~225.30%,不同林分之间最大拦蓄率没有显著性差异,最大拦蓄率之间的大小依次是侧柏和栓皮栎混交林(225.30%)>栓皮栎纯林(199.50%)>刺槐纯林(196.44%)>侧柏纯林(152.11%)>油松纯林(128.95%)>黑枣和油松混交林(115.27%);枯落物的半分解层最大拦蓄率范围为 91.65%~309.70%,半分解层中油松纯林与其他林分存在显著性差异,其他林分之间没有显著性差异,最大拦蓄率表明油松纯林(309.70%)>栓皮栎纯林(193.29%)>侧柏和栓皮栎混交林(139.36%)>刺槐纯林(122.35%)>侧柏纯林(97.96%)>黑枣和油松混交林(91.65%)。

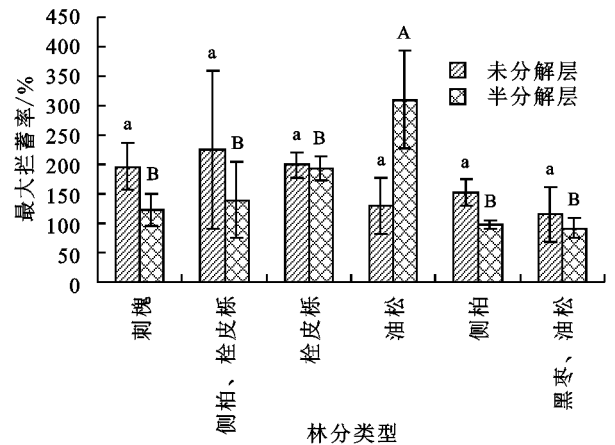
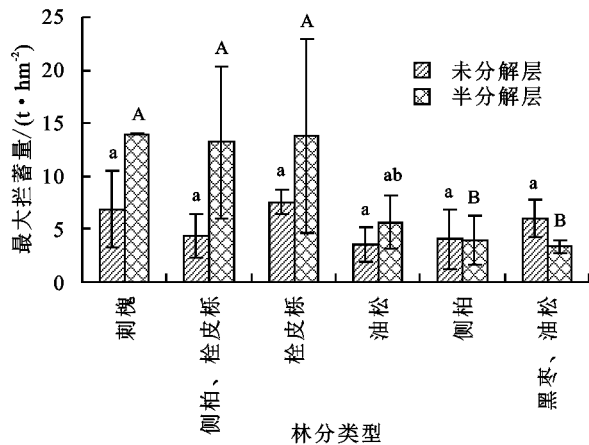


图 6 不同林分类型的枯落物最大拦蓄量和最大拦蓄率

由图 7 可知,有效拦蓄量的范围为 2.91~6.35 t/hm^2 ,栓皮栎纯林的有效拦蓄量最大,油松纯林的有效拦蓄量最小,从大到小依次为栓皮栎纯林(6.35 t/hm^2)>刺槐纯林(5.77 t/hm^2)>黑枣和油松混交林(4.39 t/hm^2)>侧柏和栓皮栎混交林(3.67 t/hm^2)>侧柏纯林(3.35 t/hm^2)>油松纯林(2.91 t/hm^2),

栓皮栎纯林和油松纯林之间差异性显著,其他林分之间差异性不显著;有效拦蓄率的范围为 88.19%~188.66%,侧柏和栓皮栎混交林的有效拦蓄率最大,黑枣和油松混交林的有效拦蓄率最小,其有效拦蓄率表现为侧柏和栓皮栎混交林(188.66%)>栓皮栎纯林(167.32%)>刺槐纯林(164.58%)>侧柏纯林

(125.42%) > 油松纯林(104.63%) > 黑枣和油松混交林(88.19%), 侧柏和栓皮栎混交林与黑枣和油松混交林差异性显著, 其他林分之间差异性不显著。

由图 7 可知, 有效拦蓄量的范围为 2.44 ~ 11.53 t/hm², 刺槐纯林的有效拦蓄量最大, 黑枣和油松混交林的有效拦蓄量最小, 从大到小依次为刺槐纯林(11.53 t/hm²) > 栓皮栎纯林(11.25 t/hm²) > 侧柏和栓皮栎混交林(10.91 t/hm²) > 油松纯林(4.65 t/hm²) > 侧柏纯林(3.35 t/hm²) > 黑枣和油松混交林(2.91 t/hm²), 侧柏纯林、黑枣和油松混交林与

油松纯林差异性不显著, 与其他林分之间差异性显著; 有效拦蓄率的范围为 66.24% ~ 255.96%, 油松纯林的有效拦蓄率最大, 黑枣和油松混交林的有效拦蓄率最小, 其有效拦蓄率表现为油松纯林(255.96%) > 栓皮栎纯林(158.63%) > 侧柏和栓皮栎混交林(115.10%) > 刺槐纯林(101.17%) > 侧柏纯林(73.29%) > 黑枣和油松混交林(66.24%), 油松纯林与其他林分之间差异性显著, 栓皮栎纯林与侧柏纯林、黑枣和油松混交林之间差异性显著, 其他林分之间差异性不显著。

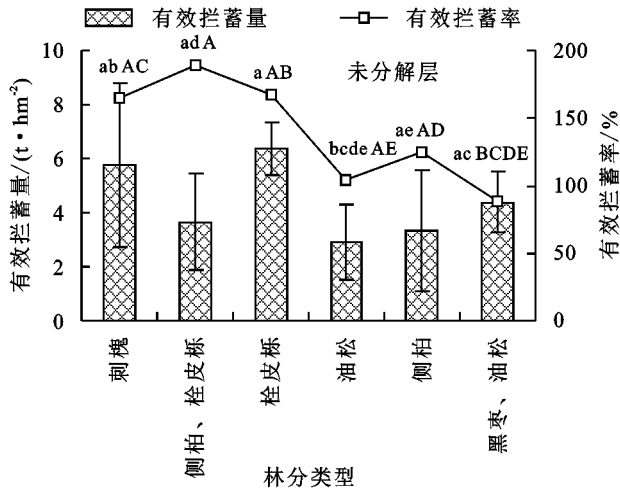


图 7 不同林分类型枯落物未分解层有效拦蓄量与有效拦蓄率

由图 8 可知, 枯落物总最大拦蓄量表现为栓皮栎纯林(21.36 t/hm²) > 刺槐纯林(20.85 t/hm²) > 侧柏和栓皮栎混交林(17.61 t/hm²) > 黑枣和油松混交林(9.38 t/hm²) > 油松纯林(9.14 t/hm²) > 侧柏纯林(8.04 t/hm²); 枯落物平均最大拦蓄率表现为油松纯林(219.32%) > 栓皮栎纯林(196.39%) > 侧柏和栓皮栎混交林(182.33%) > 刺槐纯林(159.40%) > 侧柏纯林(125.03%) > 黑枣和油松混交林(103.46%);

枯落物总有效拦蓄量表现为栓皮栎纯林(17.60 t/hm²) > 刺槐纯林(17.30 t/hm²) > 侧柏和栓皮栎混交林(14.58 t/hm²) > 油松纯林(7.56 t/hm²) > 黑枣和油松混交林(6.83 t/hm²) > 侧柏纯林(6.25 t/hm²); 枯落物平均有效拦蓄率表现为油松纯林(180.29%) > 栓皮栎纯林(162.98%) > 侧柏和栓皮栎混交林(151.88%) > 刺槐纯林(132.88%) > 侧柏纯林(99.35%) > 黑枣和油松混交林(77.22%)。

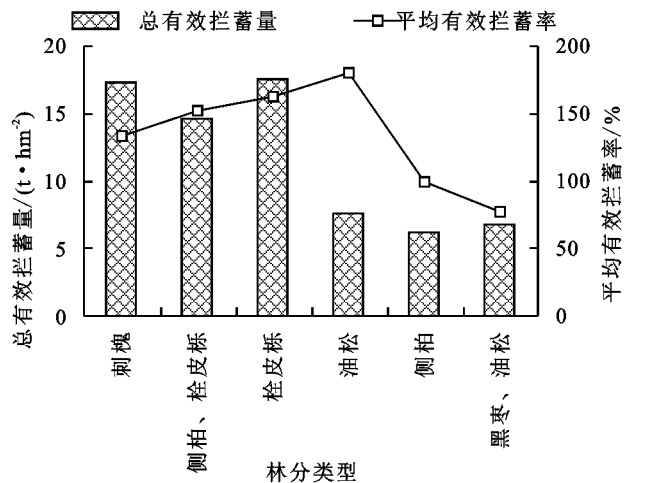
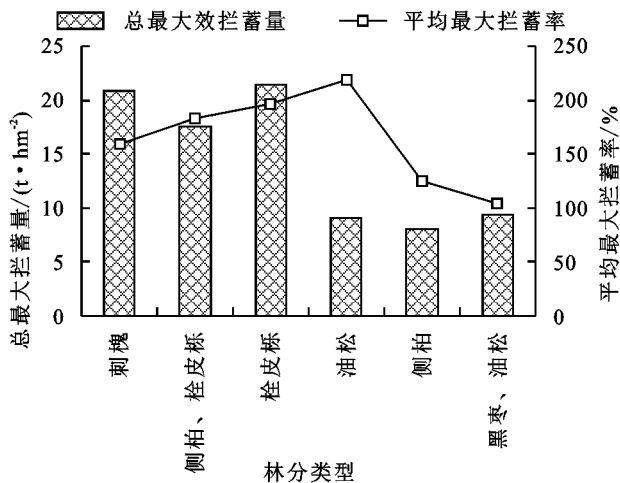


图 8 不同林分类型枯落物总拦蓄量和拦蓄率

4 讨论

各种不同林分类型的枯落物的厚度和蓄积量因

组成的树种、当地环境、林龄、郁闭度、人类活动的干扰以及枯落物本身的情况等其他多种原因的不同而

有所差异。本文研究的 6 种不同林分类型枯落物的厚度 1.0~4.0 cm, 枯落物的蓄积量变化范围 5.25~15.70 t/hm², 这与庞梦丽等^[7]研究的河北省太行山区 3 种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应结果较为相近, 而与公博等^[19]对冀北山区 6 种人工林的林地水源涵养能力的研究结果不一致, 这可能与地理位置有关, 本文选取样地的海拔为 214~230 m 左右, 而公博等^[19]的研究地区选择的海拔在 712~1 027 m。涂志华等^[13]和侯贵荣等^[20]研究表明, 刺槐林枯落物蓄积量最大, 与本文研究结果一致。总体来说, 阔叶林半分解层大于未分解层, 针叶林则相反, 这可能是由于针叶林枯落物本身含有较多难分解的酚类物质、萜类物质、单宁有关^[21-22]。一般情况下, 枯落物的蓄积量与厚度呈正相关, 但由于枯落物厚度还受自身堆叠情况和组成成分等的影响, 枯落物的蓄积量与厚度可能表现出不相关的情况。刺槐由于自身特性和堆叠状态的影响, 半分解层占比较大, 虽然厚度较小, 但蓄积量最大, 栓皮栎自身特性其凋落物堆叠状态较为蓬松, 虽然厚度较大, 但其枯落物蓄积量较小。其他针叶林或针阔混交林自身凋落物较少, 造成蓄积量和厚度都较小。

6 种不同林分类型的枯落物最大持水量中阔叶林栓皮栎和刺槐优于其他 4 种林分类型的最大持水量, 针叶林油松表现最差。其最大持水量的范围为 10.55~25.04 t/hm², 最大持水率范围为 171.19%~260.20%, 这与李阳等^[23]对几种典型林分类型枯落物的研究结果较为相近。本文与涂志华等^[13]对不同植被类型关于最大持水量方面的研究结果一致, 这可能与阔叶林枯落物分解程度较高, 半分解层蓄积量大, 其持水能力较大, 而针叶林油松分解程度低, 枯落物蓄积量小, 造成最大持水量较小。这也与胡淑萍等^[24]对阔叶林枯落物持水能力普遍高于针叶林的研究结果一致。不同林分之间枯落物持水量表现出的差别, 其原因多样复杂, 主要是枯落物的现存量和本身的持水特性所决定的, 此外还包括研究区的立地条件、组成树种等各种原因。

本文研究的 6 种不同林分类型枯落物的最大拦蓄量和有效拦蓄量可能由于枯落物自身吸水能力以及单位面积内自然含水率、最大持水率、枯落物蓄积量等不同, 使得不同林分类型之间枯落物的拦蓄能力出现差别。此外张振明等^[25]认为, 枯落物的有效拦蓄量与林分类型呈显著相关性。这与本次研究阔叶林栓皮栎和刺槐在拦蓄降雨和蓄水能力方面优于其他 4 种林分类型、针叶林侧柏则表现最差的结论一

致。在此次研究的不同林分类型枯落物的持水过程中前 2 h 吸水速度较快, 之后速度减缓, 其持水量与浸水时间符合对数函数关系: $E = a \ln t + b$, 持水速率与浸水时间的关系符合幂函数关系: $V = kt^n$, 这与已有学者^[6,9,14-15]研究结果一致。可能是由于浸水前期枯落物本身较为干燥, 与自由水的水势差较大, 吸水量较大, 随着浸泡时间的增加, 枯落物自身吸水水量增加, 接近自身最大持水量, 使其吸水速率开始减缓^[26]。枯落物持水能力采取室内浸水的模拟试验, 能够在一定程度反映拦蓄能力, 在以后的研究中还应结合野外降雨的实际情况对枯落物的拦蓄和蓄水能力进行充分研究。

通过对 6 种不同林分类型枯落物的研究, 阔叶林栓皮栎和刺槐持水能力较好, 水源涵养效果高于其他 4 种林分类型。对于持水量较小的林分类型, 可以适当增加林下植被的培养, 使得成为复合林层。同时由于人为活动的干扰也会影响水源涵养能力, 因此要减少人为活动的干扰, 加强对天然次生林的保护。在条件允许的地方可以人工适当栽植灌木层, 既可以增加枯落物蓄积量, 也可以通过枯落物的分解改善土壤结构和肥力。但在实际降雨过程中, 先是林冠层的截留和树干茎流, 其次是枯落物的持水过程, 最后是土壤层的持水能力, 本文只从枯落物层的持水能力进行了研究, 以后应该从树冠层、枯落物层和土壤层综合研究来更好地评价太行山区域水源涵养功能。

5 结论

(1) 不同林分类型枯落物总蓄积量阔叶林刺槐最大, 针叶林油松总蓄积量最小, 各林分半分解层蓄积量总体大于未分解层(针叶林油松、针阔混交黑枣和油松与之相反)。

(2) 枯落物的持水特征中最大持水量大小依次为阔叶林栓皮栎>阔叶林刺槐>针阔混交侧柏和栓皮栎>针阔混交黑枣和油松>针叶林侧柏>针叶林油松; 平均最大持水率针叶林油松纯林最大, 针叶林侧柏纯林最小。

(3) 6 种林分类型枯落物拦蓄能力中, 有效拦蓄量大小依次表现为阔叶林栓皮栎>阔叶林刺槐>针阔混交侧柏和栓皮栎>针叶林油松>针阔混交黑枣和油松>针叶林侧柏, 有效拦蓄率大小表现为针叶林油松>阔叶林栓皮栎>针阔混交侧柏和栓皮栎>阔叶林刺槐>针叶林侧柏>针阔混交黑枣和油松, 最大拦蓄率与有效拦蓄率大小规律一致。

(4) 通过综合分析对比可以发现, 阔叶林栓皮栎和刺槐在 6 种林分类型中持水能力较好。因此在以后的

森林经营活动中适当增加栓皮栎林和刺槐林以达到增强太行山枯落物的持水能力,更好地涵养水源,更好地发挥首都和雄安新区的生态屏障功能,为首都和雄安新区以及整个太行山区的生态环境做出贡献。

参考文献:

- [1] 魏强,凌雷,柴春山,等.甘肃兴隆山不同演替阶段典型森林群落的凋落物动态[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(5):27-34.
- [2] Shen W J, Peng S L, Zhou G Y, et al. Ecohydrological functions of litter in man-made *Acacia Mangium* and *Pinus elliotii* plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 5(5):846-850.
- [3] 王伟伟.栓皮栎林分枯落物对土壤-植物系统水分运动的影响[J].水土保持通报,2015,35(3):105-111.
- [4] Freschet G T, Cornelissen J H C. Linking litter decomposition of above and below ground organs to plant-soil feedbacks worldwide[J]. *Journal of Ecology*, 2013, 101(4):943-952.
- [5] Gholami L, Banasik K, Sadeghi S H, et al. Effectiveness of straw mulch on infiltration, splash erosion, runoff and sediment in laboratory conditions[J]. *Journal of Water and Land Development*, 2014, 22(1):51-60.
- [6] 兰亚男,孙旭,秦富仓,等.阴山北麓不同林分类型枯落物层持水性能研究[J].水土保持研究,2019,26(6):151-157.
- [7] 庞梦丽,朱辰光,翟博超,等.河北省太行山区3种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报,2017,37(1):52-56.
- [8] 王会京,王红霞,谢宇光.太行山不同林型枯落物持水性及生态水文效应研究[J].水土保持研究,2016,23(6):136-139,144.
- [9] 宣立辉,康凡,谷建才,等.冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J].水土保持研究,2018,25(4):86-91.
- [10] 彭云莲,金兆梁,吕刚,等.浑河源头水源涵养林枯落物持水能力研究[J].沈阳农业大学学报,2018,49(5):107-114.
- [11] 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.
- [12] 牛勇,刘洪禄,张志强.北京地区典型树种及非生物因子对枯落物水文效应的影响[J].农业工程学报,2015,31(8):183-189.
- [13] 涂志华,范志平,孙学凯,等.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[J].水土保持学报,2019,33(1):129-135.
- [14] 郝弯弯,赵鹏,李思维,等.御道口牧场不同类型防护林的枯落物水文效应[J].水土保持学报,2019,33(6):197-204.
- [15] 卢振启,黄秋娴,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.
- [16] 杨荣,杨宏伟,刘丽英,等.不同林分山杏灌木林枯落物持水性能研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(2):96-102,110.
- [17] 王安宁,蔺鑫,穆枫,等.冀北木兰围场沙荒地不同坡位黄柳沙障内枯落物的持水性能[J].北京林业大学学报,2018,40(1):98-107.
- [18] 王美莲,王飞,姚晓娟,等.不同林龄兴安落叶松枯落物及土壤水文效应研究[J].生态环境学报,2015,24(6):925-931.
- [19] 公博,师忱,何会宾,等.冀北山区6种人工林的林地水源涵养能力[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):165-170.
- [20] 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):357-363,371.
- [21] 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.
- [22] 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):54-58,70.
- [23] 李阳,万福绪.黄浦江中游5种典型林分枯落物和土壤水源涵养能力研究[J].水土保持学报,2019,33(2):264-271.
- [24] 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.
- [25] 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,2005,19(3):139-143.
- [26] 金雅琴,李冬林,孙丽娟,等.南京近郊人工林地表枯落物的累积量及持水性[J].中国水土保持科学,2018,16(5):95-104.