

北京山区主要树种枯落物水文功能特征研究

齐 记, 史 宇, 余新晓, 郑江坤, 李海光

(水土保持荒漠化防治重点实验室, 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 为研究北京山区主要树种枯落物的水文功能, 在妙峰山林场调查了栓皮栎(*Quercus variabilis*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林、侧柏(*Platycladus orientalis*)林和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林的枯落物储量, 并用两种方法测定枯落物的持水过程。研究结果表明: (1) 栓皮栎林、油松林、侧柏林和刺槐林的枯落物厚度分别为 10.5、4.0、3.8、2 cm, 储量分别为 945 g/m², 803.3 g/m², 1 024.0 g/m² 和 239.8 g/m²。(2) 采用室内浸泡法测定 4 种枯落物的最大持水率为 230.3%, 165.1%, 161.9% 和 212.0%。其中 0~2 h 是枯落物持水增加最快的阶段, 2~6 h 枯落物持水增加减慢, 6 h 以后趋于稳定。(3) 采用人工降雨法测定 4 种枯落物的最大持水率为 334.3%, 331.1%, 415.8%, 259.9%, 均大于相应的浸泡法测得的最大持水量。可将人工降雨法测定枯落物持水率随时间的变化分为 4 个阶段: 第 1 阶段为迅速吸收阶段, 第 2 阶段为缓慢吸收阶段, 第 3 阶段为逐渐饱和阶段, 第 4 阶段为饱和阶段。(4) 枯落物有效拦蓄量可以更准确地反映枯落物截持实际降雨的能力。4 种枯落物的有效拦蓄量大小为油松>侧柏>栓皮栎>刺槐。其中油松的有效拦蓄量最大, 为 12.154 t/hm²。实验发现, 浸泡法测定枯落物持水过程存在一定缺陷, 人工降雨法较好地弥补了这些不足。

关键词: 枯落物; 持水率; 浸泡法; 人工降雨法; 北京山区

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)03-0073-05

Hydrological Function of Litters of the Main Tree Species in Beijing Mountainous Area

QI Ji, SHI Yu, YU Xin-xiao, ZHENG Jiang-kun, LI Hai-guang

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Ministry of Education,
School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the hydrological function of litters of the main tree species in Beijing mountainous area, the litter reserve of *Quercus variabilis* stand, *Pinus tabulaeformis* stand, *Platycladus orientalis* stand and *Robinia pseudoacacia* stand were investigated and the water-holding processes of litter were measured in two ways. (1) The thickness of the litter layer of *Quercus variabilis* stand, *Pinus tabulaeformis* stand, *Platycladus orientalis* stand and *Robinia pseudoacacia* stand was 10.5 cm, 4.0 cm, 3.8 cm and 2 cm. Their corresponding weight was 945 g/m², 803.3 g/m², 1 024.0 g/m², 239.8 g/m². (2) The highest water-holding proportion of the four main tree species measured by soaking was 230.3%, 165.1%, 161.9% and 212.0%. During the process, water-holding proportion's fastest growing period occurred in 0~2 h, in 2~6 h, the water-holding proportion grows slowly and after 6 h, the water-holding proportion hardly increases. (3) The highest water-holding proportion of the four main tree species measured by simulating rainfall was 334.3%, 331.1%, 415.8% and 259.9%, which are correspondingly greater than those measured by soaking. The process that the water-holding proportion changes with time by simulating rainfall method can be separated into 4 phases. In phase 1, the water-holding proportion increases rapidly; in phase 2, the proportion increases slowly; in phase 3, the water-holding proportion is getting saturated; in phase 4, the litter is totally saturated. (4) The water effective interception ability of litters can reflect the litter interception ability in natural rainfall. The ranking of four kinds of litter effective interception abilities is *Pinus tabulaeformis*>*Platycladus orientalis*>*Quercus variabilis*>*Robinia pseudoacacia*. Effective interception ability of *Pinus tabulaeformis* is the the greatest, which is 12.154 t/

收稿日期: 2010-12-29

修回日期: 2011-01-18

资助项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(20080422); 国家自然科学基金项目(40871136)

作者简介: 齐记(1988-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 学士, 水土保持与荒漠化防治。E-mail: ji.qi.china@gmail.com

通信作者: 余新晓(1961-), 男, 甘肃省平凉市人, 博士, 教授, 主要研究方向: 森林水文/水土保持。E-mail: yuxinxiao111@126.com

hm²。According to the experiment, there are some defects of the soaking way to measure the water holding process of litters, which can be modified by the simulating rainfall method.

Key words: litter; water holding proportion; soaking method; simulating rainfall method; Beijing mountain area

枯枝落叶是森林生长过程的自然产物,它在森林水文调节方面有重要功能,可以控制水土流失。研究现有林地枯落物吸水机理和水文特征对保持水土、合理经营和利用森林、保护生态环境有着重要的现实意义。枯落物的水文作用主要体现在枯落物的吸水方面,吸水量的多少与其林地现存量、分解状况以及自身的含水量、天气状况等多种因子有关^[1]。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^[2-3],但对于北京山区不同树种枯落物水文功能的比较研究较少^[4-5]。

目前国内研究大多是基于浸泡法测定枯落物的最大持水量、最大持水率和持水过程,只有莫菲等采用人工降雨的方法测定枯落物持水过程^[6]。而这种充分供水条件下的测定结果究竟能在多大程度上刻画自然降雨条件下枯落物的截持特征和过程,还缺乏系统的研究和比较。本文通过实地调查与模拟实验,对北京山区主要树种枯落物的水文功能特征进行初步研究。采用室内浸泡法和人工降雨法分别测定北京山区主要树种枯落物的储量和持水过程,以期全面了解该区域主要树种枯落物的水文功能,并为该区域造林和水土保持工作提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

北京市山区面积 1.04 万 km², 占北京市总面积的 62%。西部属太行山脉,北部和东部属燕山山脉,自西、北、东三面环抱北京,是北京重要的生态屏障。气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量 600 mm,地带性植被类型为暖温带落叶阔叶林。妙峰山林场位于北京西北部,太行山北部与燕山东端交汇处,北纬 39°53′,东经 116°28′,距北京市中心 30 km,最低海拔约为 70 m,最高峰海拔 1 150 m,年降水量 650 ~ 750 mm,年平均气温 12℃。妙峰山林场在海拔 900 m 以下以山地淋溶褐土为主,900 m 以上为棕壤,土层比较薄,所含砾石较多^[7]。森林覆盖率达 96.2%,共有陆生植物 110 科 313 属 684 种,目前主要的群落类型有:油松(*Pinus tabulaeformis*)林、侧柏(*Platycladus orientalis*)林、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林、栓皮栎(*Quercus variabilis*)与槲栎(*Quercus aliena*)混交林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林等^[8]。林下灌木主要有构树(*Broussonetia papyrifera*)、酸

枣(*Zizyphus jujuba*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、孩儿拳头(*Grewia biloba*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。草本主要有鸭跖草(*Commelina communis*)、羊胡子草(*Eriophorum vaginatum*)、菅草(*Themeda japonica*)、中华卷柏(*Selaginella sinensis*)等^[9]。

1.2 研究方法

1.2.1 枯落物储量的测定 2010 年 8 月,选择妙峰山林场内典型油松林、侧柏林、刺槐林和栓皮栎林作为 4 个样地,分别在样地中分为未分解层和半分解层取枯落物,在每个样地的坡上、坡中、坡下选择有代表性的 1 m × 1 m 的样方,在样方内用钢直尺随机测量 3 个位置枯落物未分解层和半分解层^[10]的厚度并求其平均值。再将样方内枯落物分层装入牛皮纸袋中,用精度为 0.1 g 的电子天平称取鲜重;取回后,放入烘箱内设定 70℃烘干 24 h 后取出,再称其干重。

1.2.2 枯落物持水过程的测定 本次试验采用两种方法测定枯落物持水过程。

(1) 室内浸泡法。用室内浸泡法测定林下枯落物的持水量及其吸水速度的方法为,将烘干后枯落物装入自制尼龙网里浸入水中,分别在 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 10 h, 24 h 取出,沥水至没有水滴滴落为止,用精度为 0.1 g 的电子天平称重。每次取出称重后所得的枯落物湿重与其干重差值,即为枯落物浸水不同时间的持水量。

(2) 人工降雨法。2010 年 8 月,采用人工降雨法测定枯落物的吸水过程。为便于对比分析,模拟铺设的 4 种枯落物单位面积生物量均为 0.5 kg/m²,按照未分解层与半分解层烘干后质量相等的比例分层装入圆形实验筛(半径 10 cm,面积 314 cm²,高 10 cm,边框为铁皮,底为铁丝网)中,各实验筛内装填烘干后的枯落物,上层未分解层和下层半分解层均为 78.5 g。用专业模拟降雨器^[6]对装有干枯落物的实验筛进行人工降雨,为比较两种充分供水条件下枯落物的持水过程,设定试验的雨强远大于妙峰山林场地区多年平均雨强,为 300 mm/h。再由储水罐和电子天平组成的排水收集器收集实验筛底部排出的水。

每次人工降雨实验持续时间为 480 min,每个树种设置 3 次重复实验。实验初始阶段枯落物吸水过程变化较为剧烈,因此 0~90 min 内,每 5 min 对实验筛称重 1 次;90 min 后,变动幅度变小,所以在 90

~ 240 min 内, 每 15 min 对实验筛称重 1 次; 240 min 后, 重量基本保持不变, 所以 240~ 480 min 内, 每 30 min 对实验筛称重 1 次。同时测量实验筛底部排出的水量, 以校准雨强大小不变。不同时刻枯落物的降雨截持量累积值是不同时刻实验筛的重量减掉实验筛自重(同时考虑实验筛自身吸附水影响, 从测定值中减去)和枯落物干重的值, 它与枯落物干重的比值即为枯落物的持水率。

2 结果与分析

2.1 枯落物储量

在样地内测量枯落物层厚度, 所得结果见表 1。可见, 栓皮栎、侧柏、油松和刺槐这 4 个不同树种的枯落物层厚度差别明显, 其厚度分别为 10.5, 4.0, 3.8, 2 cm。栓皮栎枯落物厚度明显大于侧柏和油松, 而刺

槐枯落物厚度最小。据实地观察, 栓皮栎的叶片大而厚、堆积疏松, 而针叶树枯落物分解速度慢, 所以厚度较大; 刺槐产生的枯落物生物量小, 且叶片小而薄, 分解速度快, 厚度最小。4 种枯落物的自然含水率排序为: 栓皮栎> 油松> 侧柏> 刺槐。各样地枯落物不同层次储量比例如表 1 所示, 可以看出各树种总储量排序为侧柏> 栓皮栎> 油松> 刺槐。栓皮栎的半分解层占总重的 77.117%, 油松的半分解层占总重的 85.771%, 侧柏的半分解层占总重的 81.006%, 刺槐的半分解层占总重的 82.444%。栓皮栎的自然含水率为 137.919%, 油松为 94.821%, 侧柏为 55.762%, 刺槐为 37.615%。刺槐的自然含水率最小, 仅为栓皮栎的 36.7%, 这可能是因为栓皮栎枯落物厚度大, 水分不易蒸发; 而刺槐枯落物厚度小, 较为破碎, 自然状态下易蒸发失水造成的。

表 1 样地内枯落物储量及厚度组成

林分	厚度/cm		鲜重/(g·m ⁻²)		干重/(g·m ⁻²)		自然含水率/%
	未分解	半分解	未分解	半分解	未分解	半分解	
栓皮栎	4.0	6.5	425	1825	216.4	729.3	137.919
油松	1.5	2.3	195	1370	114.3	689.0	94.821
侧柏	1.5	2.5	260	1335	194.5	829.5	55.762
刺槐	1.0	1.0	65	265	42.1	197.7	37.615

2.2 浸泡法测定的枯落物吸水过程

通过浸泡测定枯落物最大持水量, 是研究枯落物层持水功能的传统方法。本实验中测定了栓皮栎、油松、侧柏和刺槐的未分层和半分解层的枯落物在浸泡条件下的吸持水率与浸泡时间的关系(图 1-2)。对比 4 个树种的枯落物持水率变化过程发现, 0~ 2 h 是枯落物持水增加最快的阶段, 2~ 6 h 枯落物持水增加减慢, 6 h 以后趋于稳定。

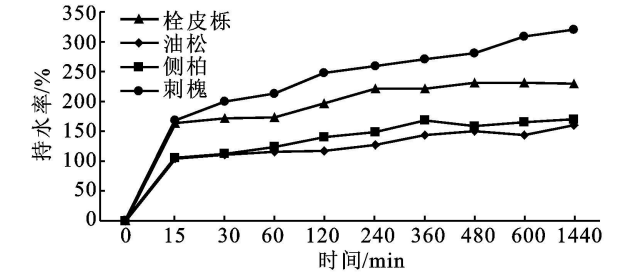


图 1 浸泡法测定未分解层枯落物持水率随时间变化曲线

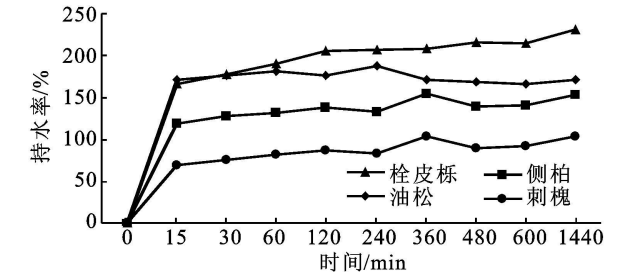


图 2 浸泡法测定半分解层枯落物持水率随时间变化曲线

从以上对比可以看出, 栓皮栎未分解层枯落物和半分解层枯落物最大持水率大致相同; 油松未分解层枯落物持水率小于半分解层; 侧柏和刺槐未分解层枯落物最大持水率大于半分解层, 其中刺槐两层最大持水率差距显著。从未分解层枯落物持水率来看, 阔叶树枯落物持水率大于针叶树枯落物。针叶树种枯落物含有较多的油脂, 其持水率往往没有阔叶树种的枯落物大^[11]。半分解层枯落物比未分解层枯落物更为破碎, 理论上讲, 半分解层最大持水量应该更大^[12]。但是实际测量的数据并不全部与理论相符。栓皮栎未分解层最大持水率为 230.0, 半分解层为 230.5, 基本相同; 油松未分解为 159.8, 半分解层为 170.4, 半分解层最大持水率较大, 与理论相符; 侧槐未分解层为 170.9, 半分解层为 153.1, 未分解层最大持水率较大, 与理论不符; 刺槐未分解层位 320.4, 半分解层为 103.6, 未分解层最大持水率明显大于半分解层, 与理论相差较大。这种差距可能是由于刺槐和侧柏半分解层枯落物较破碎, 易从纱袋中漏出, 造成湿重减少, 而计算时认为干重不变, 所以计算出刺槐半分解层枯落物持水率下降。考虑到这个原因, 实验对此进行了校正。即测量结束后, 再次用精度为 0.1 g 的电子天平称取纱袋中枯落物的重量, 将损失的重量平均分配到每次称取的湿重中, 但是结果仍然有较大误差。

2.3 模拟降雨条件下的枯落物截持过程

因为降雨并不总是均匀落在枯落物上,而且一般不会产生浸泡那样的充分供水条件,所以降雨条件下的枯落物截持过程和截持量肯定不同于浸泡实验结果。本研究用实验筛装填了烘干的枯落物(0.5 kg/m²)模拟测定枯落物截持雨水的时间变化过程(图 3)。

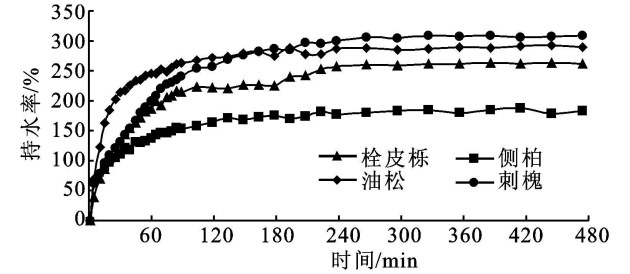


图 3 人工降雨法测定枯落物持水率随时间变化曲线

根据图 3 显示的人工降雨法测定枯落物持水率随时间的变化,可把截持过程分为 4 个阶段。第 1 阶段为迅速吸收阶段,截持速率变化很快,截持降雨主要受枯落物表面分子吸附力作用,截持速率变化与枯落物的含水量关系密切;第 2 阶段为缓慢吸收阶段,随着枯落物含水量增加,枯落物截持速率逐渐降低;第 3 阶段为逐渐饱和阶段,随着截持过程的进行,截持速率逐渐趋向于零,这时枯落物截持的降水用于本身吸收的非常少,而且主要是覆盖在枯落物表面的自由重力水;第 4 阶段为饱和阶段,枯落物湿重在某一值上下浮动,达到最大持水量。

其中阔叶树枯落物经历第 1 阶段时间为 0~ 60 min;针叶树枯落物为 0~ 30 min。阔叶树第 2 阶段为 60~ 120 min;针叶树为 30~ 120 min。第 3 阶段为逐渐饱和阶段,时间为 120~ 240 min。第 4 阶段为饱和阶段,时间为 240~ 480 min。

研究中发现,人工降雨法测定的枯落物持水过程线与对数曲线有良好的相关性。根据实验数据,建立回归方程

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

式中: Q ——枯落物持水量(g/kg); t ——浸泡时间(min); a ——方程系数; b ——方程常数项。从表 2 中可以看出,各林分枯落物得出的回归方程的复相关指数 R^2 均大于 0.9,统计量 F 的相伴概率值 P 均小于 0.001,模型拟合效果较为理想。

表 2 人工降雨法测定不同林分枯落物持水率与降雨历时关系

林分类型	回归方程	R^2	n	P
栓皮栎林	$y = 71.568 \ln(x) + 50.226$	0.9413	37	< 0.001
油松林	$y = 95.758 \ln(x) - 34.148$	0.9740	37	< 0.001
侧柏林	$y = 78.661 \ln(x) - 16.825$	0.9918	37	< 0.001
刺槐林	$y = 47.045 \ln(x) + 19.163$	0.9836	37	< 0.001

2.4 浸泡法与模拟降雨条件下枯落物截留过程对比

按照 1:1 的重量比例,将用浸泡法测定的未分解层枯落物持水率和半分解层枯落物持水率整合为图 4,和用人工降雨法测定的枯落物持水率(图 3)进行比较。对比两种测定方式下枯落物的持水过程(图 3,图 4)可以看出,无论是浸泡还是模拟降雨,枯落物吸持变化都在 4 h 左右变缓。同时,两种截持实验中的枯落物吸持水量都经历了一个由快速增长到缓慢增长、直到趋于稳定的过程。此外,虽然两种实验所测定的枯落物最大截持量结果不完全相同,但是吸持水分的过程基本一致。比较两种方法测定枯落物持水率可知,采用人工降雨法测定值均大于相应的采用浸泡法测定的持水率值。这与浸泡法本身存在缺陷,而人工降雨法弥补了这些缺陷有关。

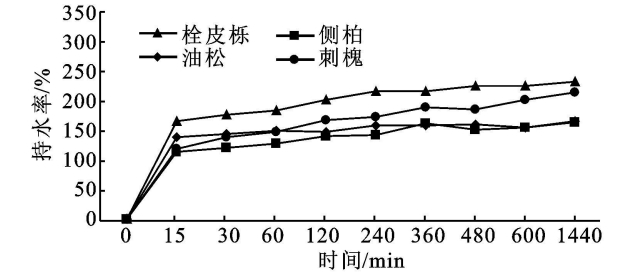


图 4 浸泡法测定枯落物持水率随时间变化曲线

2.5 枯落物有效拦蓄量

通过之前研究,我们认为人工降雨法能够更准确地模拟实际情况下枯落物截持降水过程,因此利用人工模拟降雨方法得出的各枯落物最大持水率,结合枯落物储量得出了自然条件下单位面积枯落物最大持水量(表 3)。从表 3 中可以看出,4 个树种枯落物最大拦蓄量排序为:栓皮栎> 油松> 侧柏> 刺槐。其中,栓皮栎、油松和侧柏枯落物的最大拦蓄量接近,均较大。而刺槐枯落物的最大拦蓄量明显较小。从最大拦蓄量角度来分析这 4 个树种的枯落物持水能力,刺槐的最大持水量最小,所以刺槐枯落物的水土保持功能最差。

枯落物有效拦蓄量(modified interception)可用来估算枯落物对降雨的实际拦蓄量,来估算枯落物对降雨的实际拦蓄量,计算公式为^[13]

$$W = (0.85R_m - R_o)M$$

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 ——枯落物蓄积量(t/hm²)。从有效拦蓄量来看(表 3),油松> 侧柏> 栓皮栎> 刺槐。整体呈现针叶树大于阔叶树的趋势,这与最大拦蓄量、最大持水率的情况均不同。其中油松的有效拦蓄量最大,为 12.154 t/hm²;刺槐的有效拦蓄量最小,为 5.395 t/hm²,不到油松有效拦

蓄量的 1/2。对比本研究得出的枯落物有效拦蓄量的结论和张振明等^[1]、徐娟等^[13]研究各自得出的结论都有一定的区别,说明随着采样季节、枯落物紧实

度、枯落物厚度、枯落物干燥度等指标的差异,得出的实际枯落物有效拦截深都有所区别,枯落物有效拦截深指标具有比较大的不确定性。

表 3 枯落物的拦蓄能力

树种	最大持水率/%	干重/(t·hm ⁻²)	最大拦蓄量/(t·hm ⁻²)	含水率/%	有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)
栓皮栎	261.568	9.457	24.736	137.919	7.983
油松	289.561	8.033	23.260	94.821	12.154
侧柏	182.638	10.240	18.702	55.762	10.187
刺槐	308.941	2.398	7.408	37.615	5.395

3 结论和讨论

(1) 各树种总储量排序为侧柏> 栓皮栎> 油松> 刺槐。据实地观察,栓皮栎叶片大而厚;针叶树枯落物分解速度慢;刺槐枯落物生物量小,且叶片小而薄造成了不同树种林分枯落物的储量差异。

(2) 传统的浸泡法在测量枯落物最大持水率时有较大缺陷,并不能较准确地刻画枯落物的最大持水率和吸水过程。采用室内浸泡法测定枯落物最大持水量时,枯落物损失量大。因为枯落物较为破碎,特别是半分解层的枯落物,所以从尼龙网袋中漏出部分枯落物,造成较大的损失量,且此类损失无法控制。但是采用人工降雨法会有效减少漏出的枯落物,将实验误差减小。

另外,试验沥水过程不易控制。由于沥水由人工控制,人为因素对实验结果影响较大,沥水程度稍微变化,都可能引起枯落物湿重较大变化,造成数据的上下波动。且此种实验采用的沥水方法把枯落物空隙中的悬附水沥干,与实际降雨时枯落物持水情况不相符,所以此实验模拟真实降雨的程度有限。而在人工降雨实验中,枯落物盛放在底为铁丝网的实验筛中,沥水程度易于控制,且有效减少了沥水过程对枯落物的扰动,使实验更精确。

(3) 从最大持水量角度和有效拦截量来分析这 4 个树种的枯落物持水能力,刺槐的最大持水量及有效拦截量均最小,所以刺槐枯落物的持水能力最差,刺槐林容易形成径流,造成水土流失。其他 3 个树种最大持水量相近,均较大,但是有效拦截量为油松> 侧柏> 栓皮栎。所以从实际降雨时枯落物持水的特点来看,这 3 个树种的水土保持功能均较好,其中油松的水土保持功能最佳。考虑北京山区主要树种的最大持水量及有效拦截量,可以为北京山区的树种选择提供依据。

(4) 本实验中采用的人工降雨法,虽然弥补了部分室内浸泡法测定枯落物最大持水量的不足,但是并不能完全代表实际降雨时的枯落物截持过程。在自

然环境中,影响枯落物截持过程的因素还有其它的气候、地形因子以及枯落物性质等要素^[11]。在今后进一步的研究中,可以从模拟多种雨强,铺设多种枯落物厚度的角度出发进行实验,并设计模拟多种气候条件、地形条件,以期更进一步了解枯落物的水文特性。

参考文献:

[1] 张振明, 余新晓, 牛键值, 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.

[2] 陈奇伯, 解明曙, 张洪江. 森林枯落物影响地表径流和土壤侵蚀研究动态[J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(增刊): 88-97.

[3] Onda Y, Yamamoto T. The mechanism for the infiltration lowering on soils with litter coverage[J]. Journal of the Japanese Forestry Society, 1998, 80(4): 302-310.

[4] 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(2): 146-150.

[5] 王登芝, 向星政, 聂立水. 北京西山不同人工林枯落物层的水化学性质[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2637-2641.

[6] 莫菲, 于澎湃, 王彦辉, 等. 六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2868-2876.

[7] 武巧英, 陈丽华, 于景金, 等. 北京鹫峰国家森林公园健康评价研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(12): 90-93.

[8] 刘淑燕, 余新晓, 陈丽华. 北京山区天然林乔木树种间联结与生态位研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 26-30.

[9] 杨立文, 石清峰, 李昌哲, 等. 北京西山灌木林小流域暴雨径流研究[J]. 林业科学研究, 1994, 7(5): 506-511.

[10] Bogatyrev L G, Shchenina T G, Duzhenko V S. Formal criteria for classifying forest litters[J]. Eurasian Soil Science, 1994, 26(7): 56-69.

[11] 王佑民. 中国林地枯落物持水保土作用研究概况[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 108-113.

[12] 何亚平, 费世民, 蒋俊明, 等. 四川长宁竹林凋落物的蓄水功能研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 35-41.

[13] 徐娟, 余新晓, 席彩云. 北京十三陵不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 189-193.