

重庆四面山林下典型植被对水分截留的影响

王宇, 程金花, 张建, 阚晓晴, 李语晨, 李明峰

(国家林业局水土保持与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: 为探究西南地区林下植被与水分运移的定量关系, 研究林下植被对水分截留的影响, 在重庆四面山选取草珊瑚(*Sarcandra glabra* Nakai)、杜茎山(*Maesa japonica* Moritzi)、常山(*Orixa japonica* Thunb) 3种典型常见灌木, 采用人工模拟降雨方法分别研究了单株灌木、枯落物截留特征以及灌木和枯落物组合结构的截留特征。结果表明:(1)单株灌木、枯落物、灌木和枯落物组合结构对降雨的截留过程大致分为3个阶段, 即快速截留阶段、饱和稳定阶段和降雨结束滞后冠滴雨阶段;(2)3种典型灌木草珊瑚、杜茎山、常山的截留量均随降雨强度的增大呈先增大后减小的规律;(3)枯落物最大截留量与降雨强度呈正相关关系, 枯落物单位面积质量与枯落物平均最大、最小截留量间呈正相关关系;(4)与单株灌木和枯落物各自截留状况相比, 灌木和枯落物组合结构最大截留量与降雨强度呈正相关关系, 且快速截留阶段历时较长、最大截留量也较大。在雨强为35 mm/h时, 草珊瑚、杜茎山和其枯落物组合结构最大截留量大于灌木和枯落物各自最大截留量之和, 常山和其枯落物组合结构最大截留量小于常山和其枯落物各自的最大截留量之和, 在雨强为70.95 mm/h时各组合结构最大截留量小于单株灌木和枯落物单独的最大截留量之和。林下灌木和枯落物在水分运移过程中均扮演了重要角色, 其中枯落物对水分截留的贡献更大。因此, 合理进行林下植被构建与配置能有效截留水分, 对减少林地土壤侵蚀有一定的积极作用。

关键词: 重庆四面山; 林下灌木; 枯落物; 降雨截留

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0081-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.04.013

Effects of Undergrowth Typical Vegetation on Water Interception in the Simian Mountain of Chongqing

WANG Yu, CHENG Jinhua, ZHANG Jian, KAN Xiaoqing, LI Yucheng, LI Mingfeng

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control of State Forestry Administration, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to explore the quantitative relationship between different undergrowth vegetation and moisture migration in Southwest China, and the impact of different undergrowth vegetation on water retention, three common shrubs, *Sarcandra glabra* Nakai, *Maesa japonica* Moritzi and *Orixa japonica* Thunb, were selected in the Simian Mountain. And the artificial rainfall method was used to study the interception characteristics of single shrubs and litters under different rainfall intensities, and the interception characteristics of compound structure. The results showed that: (1) The interception of single shrubs, the interception of litter and the interception of shrubs and litter assemblages were all divided into three stages, its were rapid trapping phase, saturated and stable phase, and a post-rainfall drainage phase. (2) The maximum and minimum interception rates of the studied three typical shrubs increased first and then decreased with the increase of rainfall intensity. (3) There was a positive correlation between the maximum interception of litter and rainfall intensity. The unit area quality of the litter with the mean maximum and minimum interception of the litter also showed a positive correlation. (4) Compared with single shrubs and litter alone test, the maximum interception of composite structure showed a positive correlation with rainfall intensity, and gave the longer rapid trapping phase and the larger maximum interception. When the rainfall intensity was 35 mm/h, the maximum interception

收稿日期: 2018-02-06

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD07B040304); 国家重点研发计划项目(2017YFC050550401)

第一作者: 王宇(1993—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: Wangyu_1101@126.com

通信作者: 程金花(1979—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与植被恢复研究。E-mail: Jinhua_cheng@126.com

of the composite structure of *Sarcandra glabra* Nakai and *Maesa japonica* Moritzi were larger than the sum of maximum interception of single experiment, but the maximum interception of the composite structure of *Orixa japonica* Thunb was less than the sum of maximum interception of single experiment. And the maximum interception of all the composite structure were less than the sum of the maximum interception of individual shrubs and litters when the rainfall intensity was 70 and 95 mm/h. Undergrowth shrubs and litters all played an important role in the process of water transport. Litters had a greater contribution to water interception. Therefore, rationally constructing and arranging the undergrowth vegetation could effectively retain water, which had a certain positive effect on reducing soil erosion in forest land.

Keywords: Simian Mountain of Chongqing; undergrowth shrubs; litter; rainfall interception

土壤侵蚀造成土地退化,生态环境恶化,对人类生产生活及社会可持续发展产生了很大的影响,已成为世界性的环境问题^[1]。而大量研究^[2]表明,植被是土壤侵蚀的重要影响因素,因此对植被水文作用的研究显得尤为重要。植被冠层截留降雨,会很大程度的影响降雨在地面的分布^[3-4],并且林冠截留作用可有效减弱降雨对地表的击溅,能减小林地内产流量,减轻土壤侵蚀的危害,在森林水文中有重要的作用^[5-6]。

目前,植被截留的相关研究主要集中于垂直方向上的林冠层、枯落物层等单一层的水文功能,且研究区域多在热带雨林和温带森林,对灌木的研究更少且多集中于干旱半干旱区。已有研究主要集中于林冠截留的影响因素方面,吴旭东等^[7]研究兴安落叶松林冠截留量与降雨强度的关系,发现降雨强度越小,林冠截留量越大;孙向阳等^[8]研究贡嘎山高山演替林林冠截留,得出降雨量对截留有显著影响。对于灌木截留的影响因素研究,马剑等^[9]以祁连山西水林区的 5 种典型灌木为研究对象,通过穿透雨和降雨截留观测,认为不同的灌木林冠截留之间的差距较大主要是由于不同灌木结构差异造成;霍竹等^[10]研究黄土高原水蚀风蚀交错带,发现灌木林冠截留和林冠截留率随林外降水量的增加而减小,与降水历时、雨强大小的关系比较密切。而对于降雨强度和林冠截留的关系,不同学者研究有不同的结论,李振新等^[11]发现岷江上游冷杉林林冠截留量与降雨强度无显著关系,而

Alan 等^[12]认为林冠截留量与降雨强度呈反比关系;徐先英等^[13]在干旱荒漠区,研究发现降雨强度与 3 种灌木(梭梭、怪柳、白刺)冠层截留率均呈幂函数关系。枯落物截留方面,郭雨华等^[14]通过对青海省退耕林地的调查研究,发现枯落物截留量与枯落物厚度、干重及林龄有极显著的相关性;季冬等^[15]也发现枯落物层截留量与其数量成正比关系,而截留率与降雨强度成反比关系。

前人主要针对林冠层、枯落物层等的截留特征进行研究,较少在单株尺度及一定质量枯落物条件来考虑林下灌木、枯落物、灌木和枯落物组合结构对水分截留的影响。本研究通过人工模拟降雨进行截留试验,以期定量刻画重庆四面山林下典型植被对水分截留的影响,为当地林木育种工作者评估林下灌木和枯落物层在水文循环中的功能时提供数据支撑,并为进一步确定林下植被最优结构配置奠定基础。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

本试验研究区位于三峡库区重庆市江津区四面山,根据对试验区域的调查,选取分布较为普遍的草珊瑚(*Sarcandra glabra* Nakai)、杜茎山(*Maesa japonica* Moritzi)、常山(*Orixa japonica* Thunb)3 种典型灌木(表 1)。灌木高、冠幅、冠层厚度用 10 m(1 mm)皮尺测得,叶片生物量、枝干生物量在降雨试验结束后于 80 ℃ 温度下烘干 10 h 后用电子秤测得。

表 1 灌木基本情况

灌木	高/m	冠幅/m	冠层 厚度/m	总枝 干数/枝	叶面积 指数 LAI	枝干 生物量/g	叶片 生物量/g
草珊瑚 1	1.10	0.83×0.80	0.63	10	2.14	56	43
草珊瑚 2	0.84	0.74×0.60	0.58	5	0.53	33	25
草珊瑚 3	0.84	0.82×0.68	0.50	5	1.02	35	28
杜茎山 1	1.02	1.88×0.95	0.83	12	0.48	153	51
杜茎山 2	1.23	2.30×1.10	1.00	6	0.41	165	48
杜茎山 3	0.96	0.92×0.88	0.72	5	0.77	48	20
常山 1	1.36	0.96×1.10	1.06	9	0.88	83	24
常山 2	1.46	1.10×0.90	0.95	6	0.65	81	24
常山 3	1.33	1.05×0.91	0.98	7	0.78	80	23

分别在3种典型灌木林下随机划出4块 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的枯落物样方,收集枯落物样方内未分解、半分解枯落物(阔叶收集相对完整叶片的枯落物,针叶将与枝干相连的一起收集)。收集到的枯落物于室内烘箱中(温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$)烘干后,选择每个枯落物样方内相对完整的未分解部分作为试验材料。选取枯落物时同时对其长度、宽度等结构特征进行了测量(表2)。

表2 枯落物基本情况

灌木	枯落物样方 大小/ m^2	枯落物	
		叶长/ cm	叶宽/ cm
草珊瑚	1×1	6.7~8.6	2.7~3.3
杜茎山	1×1	7.9~9.6	3.1~3.6
常山	1×1	8.1~10.0	3.2~4.9

1.2 试验方法

试验于2017年7月10日至9月2日在北京林业大学四面山科学研究基地进行,试验装置见图1。其中电子台秤量程 200 kg (精度 0.01 kg);挡雨罩为四周垂直、顶层两面带角度倾斜、正中开孔的自制装置;带孔托盘面积为 0.25 m^2 ,用于放枯落物。试验共降雨135场,其中单株灌木在3种雨强下进行降雨试验,进行3次重复共计降雨27场;枯落物分别在3种雨强条件下按3种单位面积质量进行降雨试验,进行3次重复共计降雨81场,灌木和枯落物组合结构截留试验在3种雨强下进行降雨试验,进行3次重复共计降雨27场。

降雨器采用的是由中科院水利部水土保持研究所仪器设备厂生产的BX-1型侧喷式降雨机,其降雨有效控制面积可根据喷嘴直径和工作压力来调节,有效降雨高度可分为3,4,5,6 m,降雨过程中可利用厂家标定数据设定不同雨强。根据收集的重庆四面山多年降雨资料,对比7—9月同期降雨数据,拟定试验中人工模拟降雨强度为35,70,95 mm/h。

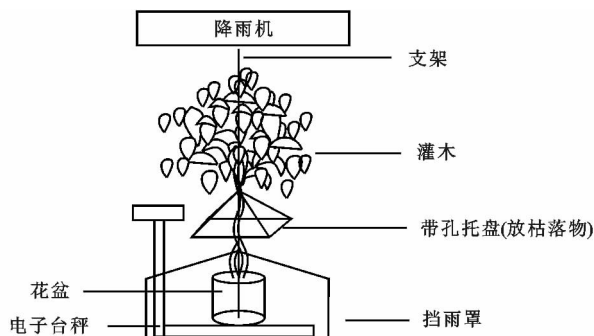


图1 人工模拟降雨截留装置示意

1.2.1 单株灌木截留 将选择好的灌木保持根系完整移植到花盆中,抚育生长6~7天后确保其存活,且生长状况良好用于试验,试验装置为图1去除带孔托盘部分,将3种灌木在不同降雨强度35,70,95 mm/h下进行试验,并重复。

开始降雨后,以1 min为间隔记录电子台秤读数,降雨开始前读数清零,在降雨结束瞬间,获得的电子秤读数即为最大截留量(C_{\max})。在降雨结束后,以1 min为间隔读数,直至电子秤读数变化小于 1 g 后停止记录,此时电子秤读数即为最小截留量(C_{\min})。降雨结束后,将花盆置于室外24 h自然风干灌木,用于下次试验。

1.2.2 枯落物截留 对选好的枯落物测其单位面积质量,发现草珊瑚枯落物单位面积质量为 $0.32\sim 0.72\text{ kg}/\text{m}^2$,杜茎山枯落物单位面积质量为 $0.32\sim 0.62\text{ kg}/\text{m}^2$,常山枯落物单位面积质量为 $0.36\sim 0.64\text{ kg}/\text{m}^2$,为保证试验结果的可比性,选取3种枯落物单位面积质量($0.40, 0.48, 0.60\text{ kg}/\text{m}^2$)作为试验所用参数。试验装置为图1去除灌木部分,将3种枯落物在不同降雨强度(35,70,95 mm/h)、不同枯落物单位面积质量($0.40, 0.48, 0.60\text{ kg}/\text{m}^2$)进行试验,并重复。

截留量读数规则同单株灌木截留试验。类似地,每次降雨结束后,将湿润的枯落物重新在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干10 h,保留相对完整部分枯落物并进行补充后进行下一次试验。

1.2.3 灌木和枯落物组合结构截留 选取3种灌木和单位面积质量均为 $0.60\text{ kg}/\text{m}^2$ 的枯落物组合,试验装置为图1,将3种组合结构在不同降雨强度(35,70,95 mm/h)下进行试验,并重复。

截留量读数规则同单株灌木截留试验。类似地,每次降雨结束后,将花盆置于室外24 h以自然风干灌木,并将湿润的枯落物重新在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干10 h,保留相对完整部分枯落物并进行补充后进行下一次试验。

1.3 数据处理

采用Excel 2013软件整理数据并绘制表格,采用Origin Pro 8软件制图。

2 结果与分析

2.1 单株灌木截留特征

2.1.1 单株灌木截留过程 从图2可以看出,不同类型灌木截留过程可大致分为3个阶段:降雨初期的快速截留阶段($0\sim 15\text{ min}$)、饱和稳定阶段($16\sim 30\text{ min}$)和降雨结束后的滞后冠滴雨阶段($31\sim 45\text{ min}$)。在快速截留阶段,草珊瑚在前5 min平均截留量占 C_{\max} 的(76.5 ± 8.5)%,杜茎山在前5 min平均截留量占 C_{\max} 的(63 ± 5)%,常山在前5 min平均截留量占 C_{\max} 的(60.0 ± 14)%。降雨历时达15 min时,各类型灌木截留量基本达最大,只因风力影响截留量会在最大截留量值上下略有起伏。30 min后结束降雨,开始进入滞后冠滴雨阶段,在滞后冠滴雨前3 min内,草珊瑚滴落量占其 C_{\max} 的(11 ± 6)%,杜茎山

滴落量占其 C_{\max} 的 $(5.5 \pm 4.5)\%$, 常山滴落量占其 C_{\max} 的 $(12.5 \pm 8.5)\%$; 滞后冠滴雨阶段开始 10 min 后各类型灌木截留量读数基本不变。

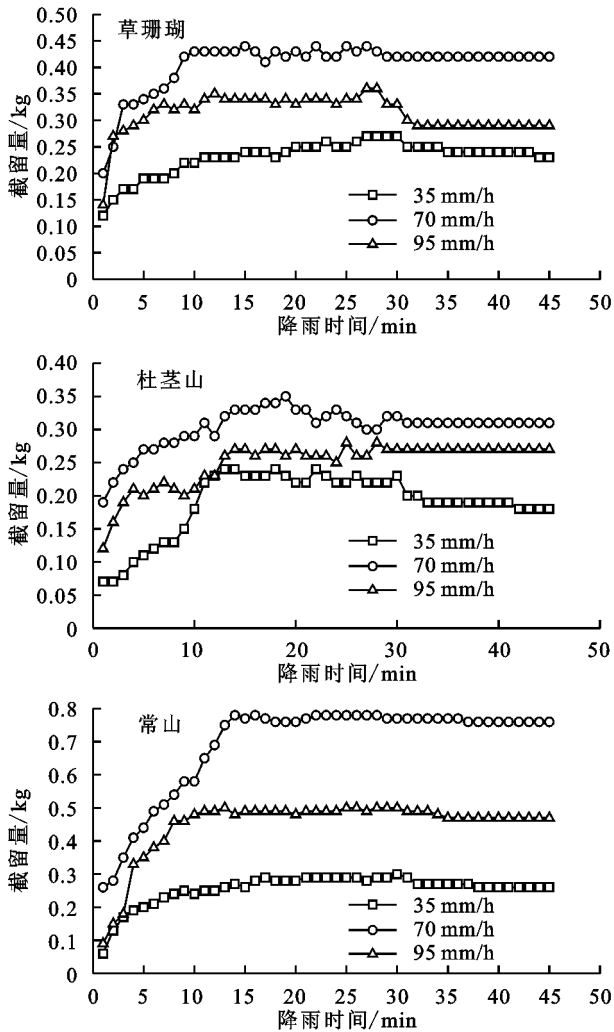


图 2 不同灌木截留量与降雨强度的关系

2.1.2 降雨强度对单株灌木截留的影响 冠层所能持留的最大水量即冠层最大截留量, 是评价森林植被层降水截留量的一个重要参数^[16], 而最小截留量作为降雨结束瞬间植物的截留量, 可定量刻画植物的截留能力, 通过对植物截留过程中最大截留量和最小截留量的研究, 可以描述整个截留过程并分析其截留能力。从表 3 可以看出, 不同灌木截留量在雨强较小时随降雨强度的增加而增加, 当雨强增大到 95 mm/h 时, 最大截留量有所减小。

表 3 不同灌木在不同降雨强度下的截留量

灌木 树种	单位: kg						$\bar{C}_{\max} \pm$ STD	$\bar{C}_{\min} \pm$ STD
	35 mm/h		70 mm/h		95 mm/h			
	C_{\max}	C_{\min}	C_{\max}	C_{\min}	C_{\max}	C_{\min}		
草珊瑚	0.27	0.23	0.44	0.42	0.33	0.29	0.35 ± 0.09	0.31 ± 0.10
杜荃山	0.23	0.18	0.32	0.31	0.27	0.27	0.27 ± 0.05	0.25 ± 0.07
常山	0.30	0.26	0.77	0.76	0.50	0.47	0.52 ± 0.24	0.50 ± 0.25

注: C_{\max} 为最大截留量; C_{\min} 为最小截留量; \bar{C}_{\max} 为平均最大截留量; \bar{C}_{\min} 为平均最小截留量; STD 为标准差。下同。

2.2 枯落物截留特征

2.2.1 降雨强度对枯落物截留的影响 从图 3 可以看出, 枯落物截留过程也分为 3 个阶段, 包括快速截留阶段(0~10 min)、饱和稳定阶段(11~30 min)、降雨结束后滞后滴雨(31~45 min)。枯落物 C_{\max} 与降雨强度呈正相关关系, 在不同灌木不同单位面积质量条件下, 3 种降雨强度下的枯落物 C_{\max} 大小顺序均为 $95 \text{ mm/h} > 70 \text{ mm/h} > 35 \text{ mm/h}$ 。

2.2.2 枯落物结构对截留的影响 在枯落物截留过程中, 枯落物质量起到了重要的作用, 枯落物质量的变化对截留量具有显著影响^[14-15], 因此, 试验选取枯落物单位面积质量(kg/m^2)为主要结构参数, 得出不同枯落物在不同单位面积质量和不同雨强下的 C_{\max} 和 C_{\min} (表 4)。

从表 4 可以看出, 当枯落物单位面积物质量由 $0.40 \text{ kg}/\text{m}^2$ 增加到 $0.60 \text{ kg}/\text{m}^2$, 草珊瑚平均 C_{\max} 由 0.40 kg 增加到 0.46 kg , 杜荃山平均 C_{\max} 由 0.417 kg 增加到 0.42 kg , 常山平均 C_{\max} 由 0.36 kg 增加到 0.38 kg 。因此枯落物单位面积质量与枯落物平均 C_{\max} 呈正相关关系。同时还可看出, 草珊瑚枯落物和杜荃山枯落物在小雨强 (35 mm/h) 时随着枯落物单位面积质量增加, C_{\max} 反而减小; 常山枯落物在小雨强 (35 mm/h) 时随着枯落物单位面积质量增加, C_{\max} 先减小后保持不变; 当雨强增大到 70, 95 mm/h 时, 各类型枯落物 C_{\max} 随枯落物单位面积质量增加而增加。

相同地, 枯落物单位面积质量与平均 C_{\min} 呈正相关关系, 每种枯落物平均 C_{\min} 均随枯落物单位面积质量增加而增加, 当单位面积质量从 $0.4 \text{ kg}/\text{m}^2$ 增加到 $0.6 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时, 草珊瑚枯落物平均 C_{\min} 增加了 0.05 kg , 杜荃山枯落物平均 C_{\min} 增加了 0.02 kg , 常山枯落物平均 C_{\min} 增加了 0.01 kg 。

2.3 灌木和枯落物组合结构截留特征

从图 4 可以看出, 灌木和枯落物组合结构的截留过程和单株灌木截留和枯落物截留过程相似, 也分为 3 个阶段(快速截留、稳定、雨后滞滴雨), 但是组合截留过程的快速截留时间明显长于单株灌木和枯落物单独截留的时间, 3 种不同类型组合结构截留过程进入稳定截留阶段的时间基本在 20 min, 相比单株灌木截留进入稳定截留阶段增加 $(10 \pm 3) \text{ min}$, 比相同单位面积质量枯落物单独截留进入稳定截留阶段增加 $(8 \pm 2) \text{ min}$ 。随着降雨强度的增大, 灌木和枯落物组合结构的 C_{\max} 也呈增大趋势, 这种结构与枯落物截留特征类似, 不同于单株灌木截留过程中 C_{\max} 与雨强的关系, 从侧面反映了在灌木和枯落物组合结构截留过程中枯落物对截留量贡献更大。

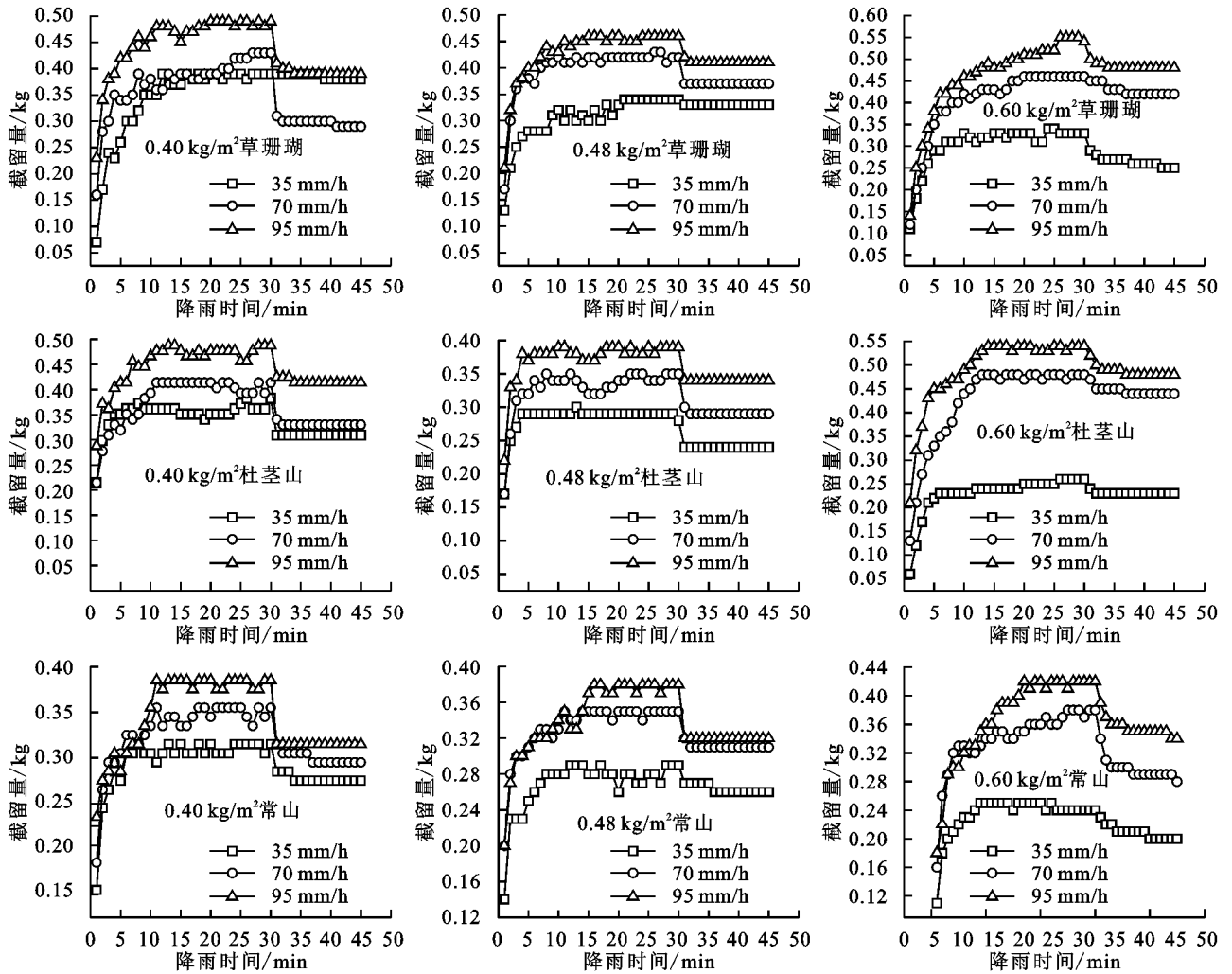


图 3 不同枯落物在不同单位面积质量下载留量与降雨强度的关系

表 4 不同枯落物在不同单位面积质量、不同降雨强度下的截留量

枯落物 类型	枯落物单位面积 质量/(kg·m ⁻²)	降雨强度 35 mm/h		降雨强度 70 mm/h		降雨强度 95 mm/h		$\overline{C_{\max}} \pm \text{STD}/\text{kg}$	$\overline{C_{\min}} \pm \text{STD}/\text{kg}$
		C_{\max}/kg	C_{\min}/kg	C_{\max}/kg	C_{\min}/kg	C_{\max}/kg	C_{\min}/kg		
草珊瑚	0.40	0.39	0.38	0.43	0.39	0.38	0.29	0.43±0.07	0.38±0.08
	0.48	0.36	0.33	0.47	0.45	0.42	0.37		
	0.60	0.33	0.25	0.54	0.48	0.52	0.47		
杜茎山	0.40	0.39	0.32	0.42	0.36	0.44	0.41	0.41±0.09	0.37±0.09
	0.48	0.28	0.27	0.45	0.39	0.49	0.45		
	0.60	0.26	0.23	0.47	0.40	0.53	0.51		
常山	0.40	0.34	0.30	0.40	0.34	0.35	0.29	0.37±0.06	0.31±0.05
	0.48	0.29	0.26	0.43	0.35	0.36	0.32		
	0.60	0.29	0.23	0.45	0.38	0.41	0.35		

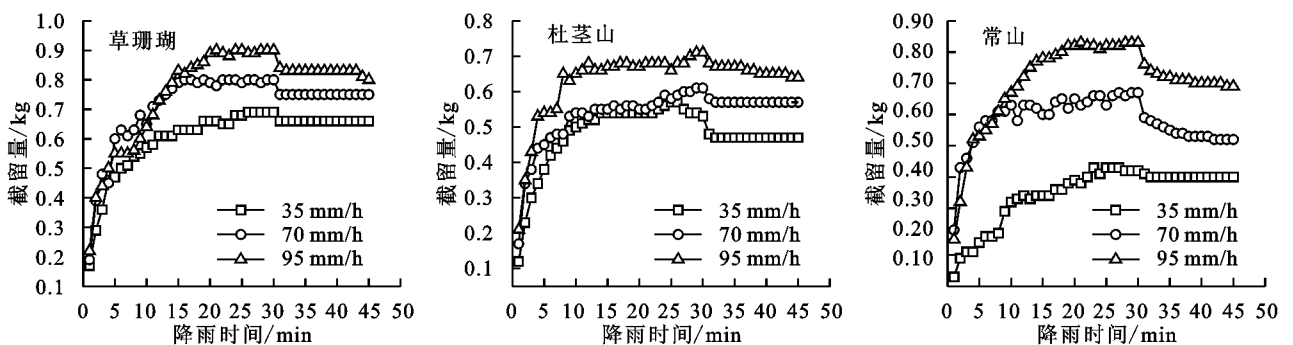


图 4 不同灌木和枯落物组合结构截留量与降雨强度的关系

同时,从表 5 可以看出,草珊瑚组合结构的平均 C_{\max} 为 0.80 kg,杜茎山组合结构的平均 C_{\max} 为 0.62

kg,常山组合结构的平均 C_{\max} 为 0.64 kg,均比单独进行截留时的 C_{\max} 大。除了草珊瑚、杜茎山和其枯落物的组合结构在 35 mm/h 雨强下的 C_{\max} 大于单株灌

木和枯落物单独截留的 C_{\max} 之和,其他灌木及其枯落物的组合结构在不同雨强下的 C_{\max} 均小于单株灌木和枯落物单独截留的 C_{\max} 之和。

表 5 灌木枯落物组合结构和单独试验在不同降雨强度下的最大截留量

单位:kg

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	组合结构 C_{\max}			单株灌木 C_{\max}			枯落物 C_{\max}		
	草珊瑚	杜茎山	常山	草珊瑚	杜茎山	常山	草珊瑚	杜茎山	常山
35	0.69	0.53	0.42	0.27	0.23	0.30	0.33	0.26	0.29
70	0.80	0.61	0.67	0.44	0.32	0.77	0.54	0.47	0.45
95	0.90	0.71	0.83	0.33	0.27	0.50	0.52	0.53	0.41

3 讨论

灌木截留过程中,在快速截留阶段的前 5 min,3 种灌木的平均截留量占其 C_{\max} 的比例达到了 60%~76.5%,与李想^[17]在北京山区以 4 种典型树种测定单株树冠截留时,降雨第 1 min 内的截留量达 C_{\max} 的 51.2% 的结果相似。本研究中降雨结束后的滞后冠滴雨量占其 C_{\max} 达 5.5%~12.5%,而在前人^[18-19]研究中滞后冠滴雨基本都达到 C_{\max} 的 10% 以上,究其不同,最主要原因可能是由于前人研究多集中于乔木冠层截留,其冠层、冠幅都较大,从而导致截留量大,进而在降雨结束后冠滴雨在重力作用下滴落量也较大。

灌木 C_{\max} 与降雨强度间的关系,随着降雨强度的增加 C_{\max} 反而减小,对于这种情况,郝奇林^[20] 在研究四川灌竹林林冠截留量与降雨强度关系时也得出相同结论,Wang 等^[21] 在研究五角枫树冠截留时也发现当降雨强度从 33.6 mm/h 增加到 125.4 mm/h 时,一株五角枫树冠 C_{\max} 减少 0.12 mm。出现这种现象的原因可能是当雨强达到 95 mm/h 时,雨滴的冲击力较大,在灌木叶片上发生溅散严重,使降雨不易停留在灌木枝叶表面,从而在高雨强下 C_{\max} 减小。

枯落物 C_{\max} 与降雨强度呈正相关关系,枯落物 C_{\max} 在不同雨强下的排序都为 95 mm/h>70 mm/h>35 mm/h。杜捷^[22] 发现雨强从 30 mm/h 增加到 120 mm/h,栓皮栎枯落物 C_{\max} 从 2.21 mm 增加到 3.22 mm,油松的 C_{\max} 由 1.74 mm 增加到了 2.73 mm。Guevaraescobar 等^[23] 在研究杨树枯落物截留时也发现,当雨强由 9.8 mm/h 增至 70.9 mm/h 时,其 C_{\max} 的增量为 0.5 mm。出现这种情况可能是所选 3 种典型灌木林下枯落物在小雨强时枯落物层表面与雨滴充分接触并进行截留,虽然雨滴发生溅散现象不是特别明显,但因雨强较小不易进入枯落物深层所以截留量较小;而在高雨强条件下,虽然能明显观察到雨滴发生溅散,但因降雨易到达深层,水分在深层枯落物间隙形成水膜,加之枯落物层之间的特殊结构,最终使降水更易被截留。由此还说明,在枯落物截留过程中,枯落物自身结构对截留量也有一定的影响作

用,正因如此,才出现了小雨强下随枯落物质量增加截留量减小,大雨强下随枯落物质量增加截留量也增加的现象。此外,枯落物单位面积质量与枯落物平均 C_{\max} 、 C_{\min} 呈正相关关系,这一结论与 Putuhena 等^[24] 和 Li 等^[25] 的研究结果一致,该现象出现的原因可能是随着枯落物单位面积质量的增加,使得水分在枯落物层间移动下渗速度减缓,整个枯落物层都能接触水分进行截留,平均 C_{\max} 、 C_{\min} 进而增大。

灌木和枯落物组合结构的 C_{\max} 随降雨强度的增加而增加,与枯落物灌木 C_{\max} 和雨强关系相似而不同于单株灌木 C_{\max} 同雨强关系,可以得出枯落物在组合结构截留过程中贡献更大。而且草珊瑚、杜茎山和其枯落物的组合结构 C_{\max} 在小雨强(35 mm/h)下大于单株灌木和枯落物单独截留的 C_{\max} 之和,而大雨强(70 mm/h 和 95 mm/h)下的组合结构其 C_{\max} 均小于单株灌木和枯落物单独截留的 C_{\max} 之和。李想^[17] 在研究乔木和枯落物复合结构截留过程时发现在截留初期,树冠截留在复合结构中起主要作用,截留率达 54.1%;后期截留主要是枯落物起主要作用,平均截留率达 34.2%,而此时林冠截留率只有 14.2%。说明在灌木和枯落物组合结构中,最终截留量主要取决于枯落物,因此在小雨强下,由于降雨在灌木叶片发生溅散少,且可以不断补充到枯落物层,导致枯落物能截留更多降雨,总的截留量也更大;而在大雨强下,由单株灌木截留与雨强关系可知大雨强下灌木截留量减少,加之大雨强下雨滴在灌木叶片发生较严重溅散作用,灌木滴落雨滴对枯落物层贡献不大,从而导致总体截留量也减小。

4 结论

(1)单株灌木截留、枯落物截留、灌木和枯落物组合结构截留,其过程均大致分为 3 个阶段,包括降雨初期的快速截留阶段、饱和稳定阶段和降雨结束后的滞后冠滴雨阶段,但组合结构快速截留阶段历时明显长于其他两种截留过程。

(2)单株灌木截留,在快速截留阶段开始 5 min 内,截留量占最大截留量的比例达到 60%~76.5%,

随降雨历时增加,截留量逐渐达到最大截留量并进入饱和稳定阶段;滞后冠滴雨阶段水分滴落主要发生在前3 min内,滴落量占最大截留量的5.5%~12.5%。单株灌木最大截留量随降雨强度的增加呈现先增大后减小的趋势。

(3) 枯落物最大截留量与降雨强度呈正相关关系,在各种单位面积质量下,3种雨强下各类型灌木的枯落物最大截留量大小顺序均为95 mm/h > 70 mm/h > 35 mm/h。枯落物单位面积质量与枯落物平均最大、最小截留量均呈正相关关系,在小雨强35 mm/h下,枯落物最大截留量随单位面积质量增加而减小;在大雨强70 mm/h和95 mm/h下,枯落物最大截留量随单位面积质量增加而增大。

(4) 灌木和枯落物组合结构的截留试验与单株灌木和枯落物截留试验相比,截留过程中快速截留阶段历时更长、截留量更大,且截留量随降雨强度增加而增加。在小雨强(35 mm/h)时,草珊瑚、杜茎山和其枯落物组合结构的最大截留量大于单独试验最大截留量之和,常山和其枯落物组合结构的最大截留量小于单独试验最大截留量之和;在大雨强(70, 95 mm/h)时,各类型灌木和其枯落物组合结构的最大截留量均小于单株灌木和枯落物单独的最大截留量之和。

参考文献:

- [1] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [2] Wang H S, Liu G B. Analyses on vegetation structures and their controlling soil erosion[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1999, 13(2): 62-68.
- [3] 孙增慧, 张卫华. 植被冠层对降雨空间分布特征及土壤侵蚀影响的研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2016(6): 43-49.
- [4] Kato H, Onda Y, Nanko K, et al. Effect of canopy interception on spatial variability and isotopic composition of throughfall in Japanese cypress plantations[J]. Journal of Hydrology, 2013, 504(10): 1-11.
- [5] 王礼先, 朱金兆. 水土保持学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [6] 宋吉红, 张洪江, 孙超, 等. 缙云山自然保护区不同森林类型林冠的截留作用[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 71-75.
- [7] 吴旭东, 周梅, 张慧东. 兴安落叶松林冠截留与降雨量及降雨强度的关系[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2006, 27(4): 83-86.
- [8] 孙向阳, 王根绪, 李伟, 等. 贡嘎山亚高山演替林林冠截留特征与模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 23-29.
- [9] 马剑, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山西水林区灌木林降雨截留特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 363-368.
- [10] 霍竹, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带降水及灌木林冠截留特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5): 88-92.
- [11] 李振新, 欧阳志云, 郑华, 等. 岷江上游两种生态系统降雨分配的比较[J]. 植物生态学报, 2006, 30(5): 723-731.
- [12] Alan M, Ali F. Throughfall characteristics in three non-native Hawaiian forest stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11): 1453-1466.
- [13] 徐先英, 严平, 郭树江, 等. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 141-145.
- [14] 郭雨华, 韩煌, 李嘉, 等. 大通退耕地植物群落植冠层截留性能和枯落物容水性能研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 50-53.
- [15] 季冬, 关文彬, 谢春华. 贡嘎山暗针叶林枯落物截留特征研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 86-90.
- [16] 石培礼, 吴波, 程根伟, 等. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 351-360.
- [17] 李想. 北京山区树冠和枯落物结构对幼林水文防蚀功能动态研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [18] Calder I R. Dependence of rainfall interception on drop size: Development of the two-layer stochastic model[J]. Journal of Hydrology, 1996, 185(1/4): 363-378.
- [19] Pitman J I. Rainfall interception by bracken litter: Relationship between biomass, storage and drainage rate[J]. Journal of Hydrology, 1989, 111(1/4): 281-291.
- [20] 郝奇林. 岷江上游亚高山森林林冠截留与枯落物层持水特性的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [21] Wang A, Diao Y, Pei T, et al. A semi-theoretical model of canopy rainfall interception for a broad-leaved tree[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(3): 2458-2463.
- [22] 杜捷. 北京山区森林枯落物层水文过程模拟研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [23] Guevaraescobar A, Gonzalezsosa E, Ramossalinas M, et al. Experimental analysis of drainage and water storage of litter layers[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(5): 1703-1716.
- [24] Putuhena W M, Cordery I. Estimation of interception capacity of the forest floor[J]. Journal of Hydrology, 1996, 180(1/4): 283-299.
- [25] Li X, Niu J, Xie B. Study on hydrological functions of litter layers in North China[J]. PLoS One, 2013, 8(7): 1-13.