

DOI: 10.5846/stxb201803150516

吕刚,王磊,张卓,王锋柏,汤家喜,杜昕鹏,董亮,杨聪.辽西低山丘陵区不同年龄荆条冠层截留降雨模拟实验研究.生态学报,2019,39(17):

Lü G, Wang L, Zhang Z, Wang F B, Tang J X, Du X P, Dong L, Yang C. Simulated and experimental study on rainfall interception of different aged *Vitex negundo* var. *heterophylla* canopies in the low mountains and hills of western Liaoning. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17):

辽西低山丘陵区不同年龄荆条冠层截留降雨模拟实验研究

吕刚^{1,*}, 王磊², 张卓³, 王锋柏⁴, 汤家喜¹, 杜昕鹏¹, 董亮¹, 杨聪¹

1 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000

2 北京林丰源生态环境规划设计院有限公司, 北京 100089

3 国有彰武县章古台林场, 阜新 123000

4 辽宁省风沙地改良利用研究所, 阜新 123000

摘要:为揭示辽西低山丘陵区不同年龄荆条冠层降雨截留的变化规律,本研究采用人工模拟降雨动态监测荆条冠层降雨截留情况,并建立了经验模型。结果表明:荆条冠层未截留量与降雨量呈线性显著正相关,且随年龄增加,未截留量的增加速率减小;250min 时未截留率趋向稳定为 1 年生 91.87% > 2 年生 89.75% > 3 年生 85.08% > 4 年生 79.00%,未截留率与降雨量显著正相关;荆条截留量随着降雨量的增加而增加,在 250min 时 4 年生为 5.25±0.49mm > 3 年生 3.73±0.65mm > 2 年生 2.60±0.23mm > 1 年生 1.93±0.55mm,且 1、2 年生荆条截留量趋向稳定;250min 后冠层截留率逐渐变小并趋向稳定值,4 年生 21.00% > 3 年生 14.92% > 2 年生 10.25% > 1 年生 8.13%;荆条附加截留量 4 年生为 0.27±0.03mm > 3 年生 0.17±0.04mm > 2 年生 0.14±0.01mm > 1 年生 0.09±0.02mm。本研究揭示了不同年龄荆条冠层截留降雨的基本规律,验证了附加截留量,为进一步研究荆条的生态水文效应提供了科学的理论依据,对水土保持树种优选和辽西地区水土流失治理具有一定的指导意义。

关键词:荆条;林龄;人工模拟降雨;降雨截留;附加截留;辽西低山丘陵区

Simulated and experimental study on rainfall interception of different aged *Vitex negundo* var. *heterophylla* canopies in the low mountains and hills of western Liaoning

LÜ Gang^{1,*}, WANG Lei², ZHANG Zhuo³, WANG Fengbai⁴, TANG Jiayi¹, DU Xinpeng¹, DONG Liang¹, YANG Cong¹

1 College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2 Beijing Greensource Environment Planning and Design Institute Co. Ltd., Beijing 100085, China

3 State-owned Zhangwu County Zhang Gu Tai Forest Farm, Fuxin 123203, China

4 Liaoning Province Wind and Sand Land Improvement and Utilization Research Institute, Fuxin 123203, China

Abstract: Low mountainous and hilly regions of western Liaoning have a semi-arid climate, are located at the southern edge of Horqin sandy land, and are very vulnerable to soil and water loss. *Vitex negundo* var. *heterophylla*, a native species, plays an important role in soil and water conservation; thus, research on the principles of rainfall interception based on the distribution of the *Vitex negundo* var. *heterophylla* canopy is crucial. To reveal the variation in rainfall interception of

基金项目:国家自然科学基金(41501548)

收稿日期:2018-03-15; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lvgang2637@126.com

different aged *Vitex negundo* var. *heterophylla* canopies, rainfall interception of *Vitex negundo* var. *heterophylla* canopies were monitored using artificial rainfall simulation. An empirical model was established. The results showed that there was a significantly positive linear correlation between non-interception by canopies and rainfall rate, with the rate of canopy non-interception decreasing with increasing canopy age. The non-interception rate of the canopy tended to be stable for 250 minutes. Non-interception rates are 91.87% for 1-year-old canopy > 89.75% (2-years old) > 85.08% (3-years old) > 79.00% (4-years old). Non-interception rate and rainfall were significantly positively related. The interception amount of different ages canopies increased with increasing rainfall, and were 5.25 ± 0.49 mm (4-years old) > 3.73 ± 0.65 mm (3-years old) > 2.60 ± 0.23 mm (2-years old) > 1.93 ± 0.55 mm (1-year old) for 250 minutes. Additionally, the interception amount of 1-year old and 2-year-old *Vitex negundo* var. *heterophylla* canopies tended to be stable. Canopy interception rates gradually decreased and tended to be stable after 250 minutes; they were 21.00% (4-years old) > 14.92% (3-years old) > 10.25% (2-years old) > 8.13% (1-year old). Additional interception amounts by *Vitex negundo* var. *heterophylla* canopies were 0.27 ± 0.03 mm (4-years old) > 0.17 ± 0.04 mm (3-years old) > 0.14 ± 0.01 mm (2-years old) > 0.09 ± 0.02 mm (1-year old). The study revealed the basic principles of rainfall interception by different aged *Vitex negundo* var. *heterophylla* canopies, verified the additional interception, and provided a scientific theoretical basis for further study. It is of great significance to the selection of tree species for soil and water conservation and soil erosion control in western Liaoning.

Key Words: *Vitex negundo* var. *Heterophylla*; stand age; artificial simulation of rainfall; rainfall interception; additional interception; low mountainous and hilly regions of western Liaoning

植被在生态系统水文循环和水量平衡中有着极其重要的地位^[1]。植被冠层是调节自然降水,对降水进行再分配的起点,是植被水源涵养以及森林水文系统中的首要层级。植物林冠、枝叶以及地表枯枝落叶对降水进行拦截^[2-3]、留蓄^[4],最终使降水到达地表的时间延长或使部分降水未及地表便蒸散^[5],从而减少了降雨对土壤的侵蚀。因此研究植被冠层截留降雨过程以及研究影响植被冠层降雨截留能力大小因素,对于评价植被水土保持功能,了解某一地区土壤侵蚀现状具有十分重要的意义。

国内外关于植被降雨截留多针对于乔木树种,但近年来,随着我国对于干旱区与半干旱区生态环境恢复的日益关注,对于植被冠层降雨截留的研究对象逐渐倾向于灌木、草本^[6-7]。截留观测内容主要包括,林外总降雨量、林下透雨量以及茎干流量^[8],然后通过雨量平衡公式进行截留量的推算,构建经验性统计模型^[9-10]。目前大部分研究是针对某物种单一年龄或不同物种间的次降雨截留特征,缺乏对植物截留特征随年龄变化的规律研究以及降雨过程中植物的截留变化规律研究,而关于荆条的研究主要集中在对其根系^[11-12]、冠层^[13-14]以及其他生物特性的研究,缺乏关于荆条森林水文过程的研究。

据第4次遥感调查显示,辽西地区水土流失面积为209.06万 hm^2 ,占该地区总土地面积的41.59%,占全省总侵蚀面积49.42%,土壤侵蚀模数5000—8000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[15]。建国以来,辽宁省营造了大片樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv.)纯林和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)纯林,而广泛分布在锦州、朝阳、阜新等市县(其占面积约为6.67万 hm^2 以上)的乡土树种荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)却被忽视^[16]。荆条适应性强,耐贫瘠、严寒、干旱,易自然更新,根系发达且具有较高的生态价值、观赏价值、经济价值和药用价值^[17]。本文以此为切入点,将广泛分布于辽西低山丘陵区土石质山坡的荆条作为研究对象,采用野外人工降雨的方法对不同年龄荆条冠层进行降雨截留模拟实验,以揭示荆条冠层随年龄变化的降雨截留规律,为进一步研究荆条的生态水文效应提供前期基础数据支撑。

1 研究区概况

研究区位于辽宁省阜新市彰武县大四家子镇千佛山境内(E122°52'16"—122°52'19", N42°33'40"—42°33'43"),属于科尔沁沙地南部,海拔183—186 m,属温带半干旱大陆性季风气候区,四季分明,雨热同季,

昼夜温差大,光照充足,降雨少,蒸发量大。多年平均降水量 240 mm,降雨多集中在 7—8 月,多年平均蒸发量为 1781 mm,年平均气温 7.1 ℃,最高气温 38.6 ℃,最低气温 -30.4 ℃。秋冬两季多西北风,春夏多南风,年平均风速 3.8 m/s。多年平均无霜期 140 d。平均冻土深度 1.11 m。土壤类型为黄土状棕壤,属于辽西土石质山区。植被属华北植物区系、蒙古植物系和长白植物系交错地区,主要分布的乔木树种以油松、樟子松、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、山杏 (*Armeniaca sibirica* (L.) Lam.) 等,中早生的草本和灌木,如荆条、虎榛子 (*Ostryopsis davidiana*)、酸枣 (*Zizyphus jujuba* var. *spinosa*)、白茅 (*Imperata cylindrica*)、野古草 (*Arundinella hirta*) 等,旱生植物如兴安胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、多叶隐子草 (*Cleistogenes polyphylla*)、百里香 (*Thymus mongolicus*)、大针茅 (*Stipa grandis*) 等,耐旱植物紫菀 (*Aster tataricus*)、羊草 (*Leymus chinensis*) 等^[18]。

2 实验设计

2.1 样地布设

结合 2017 年 6—8 月对研究区荆条群落分布状况的踏勘,样地 (10 m×20 m) 布设在半阳坡的荆条群落中。查阅当地造林作业记录得知该地区荆条进行了自然更新,最大荆条年龄为 4 年。将样地荆条按不同年龄层次进行分组后,在各组中随机选取样本进行冠幅、株高和投影面积地测量,详见表 1。由于荆条株高较低,冠幅较小,故采用卷尺进行直接测量。

表 1 荆条群落生物特征

Table 1 Biological characteristics of *Vitex negundo* var. *heterophylla* community

植株年龄 /a Plant age	株数 Plant number	株高 /cm Plant height	投影面积 /m ² Projected area	分支数 Branch number
4	4	98.53±8.23	0.3528±0.0735	3.6±0.5
3	3	72.65±5.84	0.2663±0.0522	2.7±0.6
2	5	49.92±4.31	0.1445±0.0322	1.8±0.4
1	5	18.68±2.57	0.0237±0.0098	1.0

2.2 样本选择

若对各年龄层次多株荆条样本分别进行模拟降雨,很容易因重新布置实验器材而带来随机误差,又因为荆条各年龄层次冠层形状均相似,故决定在各个年龄层次选取具有典型代表性荆条植株各 1 株进行野外模拟降雨实验,即选择尽可能与平均株高、投影面积以及分支数相近的植株作为观测样本。待野外实验结束后,地上部分生物量干重采用整株移除法进行室内测量,即将典型荆条样本整株移除,分离枝干和叶片后自然风干,再分别测量,基本生物特征见表 2。

表 2 样本基本生物特征

Table 2 Basic biologic feature of sample

编号 Number	植株年龄/a Plant age	株高/cm Plant height	冠幅形状 Crown shape	冠幅/cm×cm Crown	投影面积/m ² Projected area	分支数 Branch number	地上部分生物量干重 Dry weight of above ground biomass	
							枝干/g Stem	叶/g Leaf
1	4	96	三角形	97×80	0.3880	4	139.78	116.48
2	3	72	菱形	80×34	0.2720	2	72.91	67.75
3	2	49	平行四边形	50×28	0.1400	2	41.20	42.92
4	1	20	菱形	24×10	0.0240	1	22.39	23.29

2.3 人工模拟降雨截留实验

荆条是一种没有明显主干,支干上多对生叶片,直根系,主根不明显,侧根较为发达,矮小而丛生的多年生木本植物,见图 1。在进行植被降雨截留的相关测量时,由于分支较多,茎干流量的测量方法并不适用乔木茎

干测量的方法^[2],综合考虑研究目的以及已有研究^[6,19],本实验采用塑料布围拦法与人工降雨,见图1。与大部分在自然降雨条件下观测植物地上部分截留变化的研究^[20-21]不同,人工模拟降雨条件下进行植被截留降雨实验,避免了野外长期观测和对天气状况的要求,也极大地控制了除研究变量以外的随机变量。同时,在人工模拟降雨条件下,可以对实验过程中具体的截留过程进行观测,也便于样本之间的相互比较。根据水量平衡原理:

$$I_c = P_c - I_{-c} \quad (1)$$

式中: I_c 为截留量, P_c 为林外降雨量, I_{-c} 为未截留量。

其他相关变量定义:截留率($I_c\%$)为截留量占总降雨量的比例,未截留率($I_{-c}\%$)为荆条未截留量占总降雨量的比例,截留量增加量(ΔI_c)为单位降雨量下载留量的增加量。

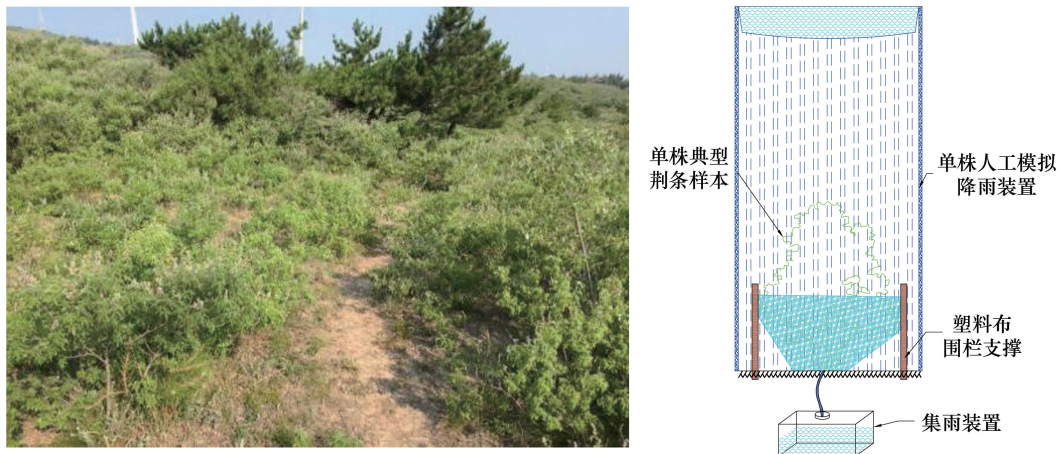


图1 实验材料及人工模拟降雨截留

Fig.1 Experimental material and artificial simulation of rainfall interception

P_c 为人工降雨条件下所设定的值, I_{-c} 直接通过集雨器测量获得。具体方法为先对荆条根部进行清理,使根部土壤与四周相平,然后按照被测灌木的最大投影面积对其四周与底部用塑料布进行围挡,尽可能减少褶皱,四角用支撑杆固定塑料布,植株与地面接触处缝隙用泡沫胶填充,最后在低地势处开口用小胶管连接集雨器。根据中国气象数据网^[22]历史资料,研究区次降雨强度主要为中雨,其多年降雨频次约占总降雨次数35%左右,人工降雨器采用自制1m×1m正方形框架孔点式降雨器,在降雨范围内按对角线设置5个雨量计,进行降雨均匀度率定,公式见(2):

$$p = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |I_i - \bar{I}|}{n\bar{I}} \quad (2)$$

式中: p 为降雨均匀度, \bar{I} 为各个点位降雨量均值, I_i 为各个点位降雨量, i 为雨量计数。

经测算调整后,均匀度调整降雨均匀度为83%,降雨高度为3m(为保证雨滴终速,供水处进行增压)。降雨强度控制为单一降雨强度6mm/h,根据我国降水强度国家标准:中等降雨强度 R_1 为2.5—7.9mm; R_{12} 为5.0—14.9mm; R_{24} 为10—24.9mm。实验过程中按照时间顺序对集雨器中收集水量进行测量,不同降雨历时则对应了不同降雨量。为避免外界因素对实验结果的影响,选择无风、晴朗,实验前一天未下雨且未经历较长时间干旱时进行实验,以保证荆条叶片干燥、舒展,实验时天气情况记录表见表3,每株荆条进行3次实验,每次实验前应对塑料布、集雨器和胶管进行湿润,实验过程中测量读数,取出集雨器时应立刻将备用集雨器与胶管相连,以免下一个数据期间的降雨收集量损失。最后一次实验后应立即测量塑料布重量以及干燥后塑料布重量,以修正误差。

3 结果与分析

3.1 I_c 随荆条年龄和降雨的变化特征

荆条未截留量反映的是荆条未能对降雨进行截留或截留后满溢而最终掉落在土壤上的部分降雨量, 体现在本次实验中的是每一个时间点(相对于不同降雨量)的集雨器收集的水量。各年龄荆条 I_c 随降雨量变化见图 2, 各年龄荆条未截留率随降雨量变化见图 3。

表 3 实验气象历史资料

Table 3 Meteorological historical data of experiments

日期 Date	时间 Time	气温/°C Temperature	天气 Weather	风向 Wind direction	风力 Wind-force	相对湿度/% Relative humidity
2017/8/24	13:00—17:00	24.8—26.6	晴	南风	2 级	63—76
2017/8/25	13:00—17:00	23.2—25.5	晴	南风	1 级	64—78
2017/8/31	13:00—17:00	23.6—24.2	晴	南风	1 级	72—85

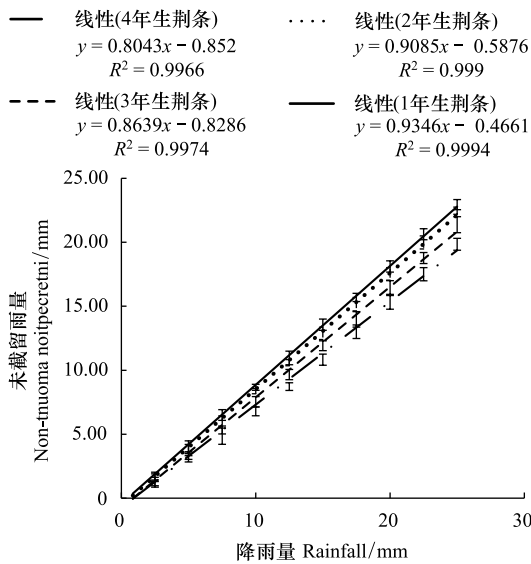


图 2 各年龄荆条未截留量随降雨量变化规律

Fig.2 The variation of non-interception amount of various ages *Vitex negundo* var. *heterophylla* with rainfall

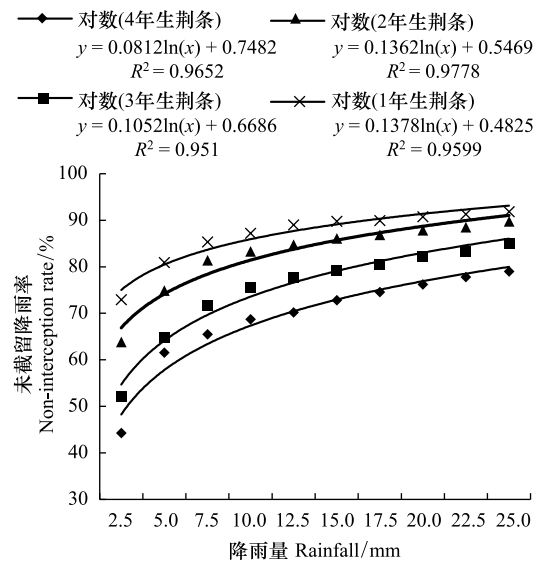


图 3 各年龄荆条未截留率随降雨量变化规律

Fig.3 The variation of non-interception rate of various ages *Vitex negundo* var. *heterophylla* with rainfall

通过对降雨量和各年龄荆条的 I_c 均值和 $I_c\%$ 均值进行回归分析, 发现随着降雨量的线性增加, 荆条 I_c 均值呈增加趋势, 呈显著正相关 ($p < 0.01$), 拟合优度 R^2 均大于 0.99; 随着荆条年龄的增加其线性趋势线 k 值逐渐远离 1, 1 年生为 0.9346 > 2 年生为 0.9095 > 3 年生为 0.8639 > 4 年生为 0.8043; x 轴截距分别为 4 年生 1.06 mm (10.6 min) > 3 年生 0.96 mm (9.6 min) > 2 年生 0.65 mm (6.5 min) > 1 年生 0.50 mm (5.0 min), 而实际出流时间为 4 年生 12 min > 3 年生 9 min > 2 年生 7 min > 1 年生 5.5 min, 实际时间与预测时间变化规律一致, 而出现的误差可能是由于塑料布褶皱聚水, 导致出流较迟。250 min 后 $I_c\%$ 趋向稳定值为 1 年生 91.87 % > 2 年生 89.75 % > 3 年生 85.08 % > 4 年生 79.00 %。 $I_c\%$ 均值随着降雨量增加而增加, 对 I_c 均值和降雨量之间关系进行拟合, 对数函数具有更高拟合度并符合实际变化规律, 呈显著正相关关系 ($p < 0.01$)。

3.2 I_c 随荆条年龄和降雨的变化特征规律

荆条截留降雨的能力受其自身多种因素影响, 如叶面积指数、枝叶生长方式^[23]、植株倾斜角度^[24]等。在相同立地条件与人为扰动下, 这些因素都与其生长年龄有关, 而植株年龄则可以作为综合指标值反映荆条的

截留降雨能力。各年龄荆条截留量随降雨量变化规律见图 4, 随年龄增加荆条最大截留量变化规律见图 5, 各年龄荆条截留率随降雨量变化规律见图 6。

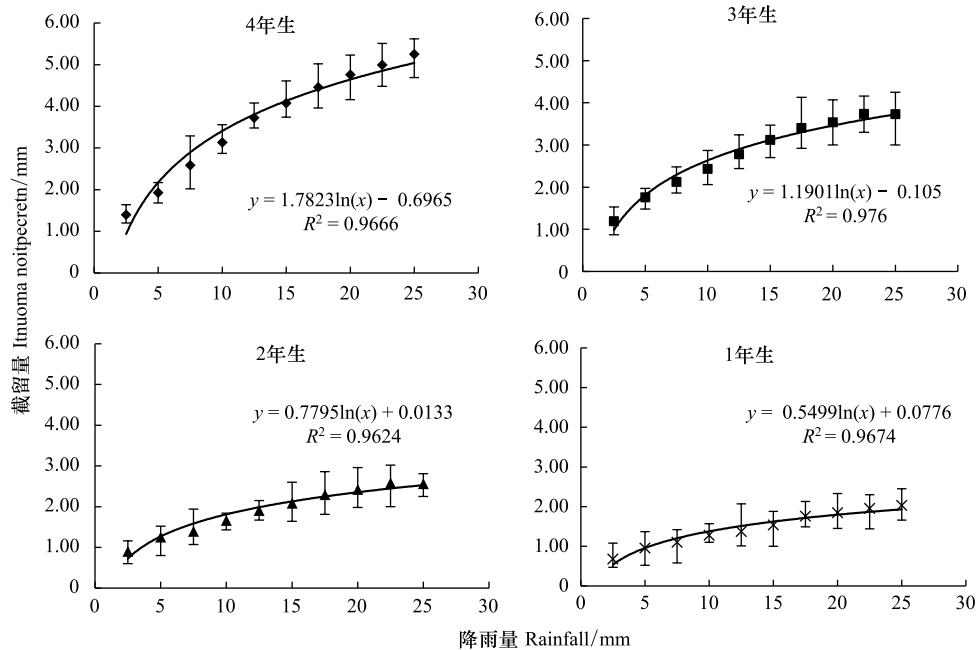


图 4 各年龄荆条截留量随降雨量变化规律

Fig.4 The variation of interception amount of various ages *Vitex negundo* var. *heterophylla* with rainfall

由图 4 可知, 截留雨量节点正负误差形成绝对误差范围占均值的比例较大, 即相对误差较大, 1 年生 56.20% > 2 年生 39.58% > 3 年生 30.54% > 4 年生 23.15%, 这是由于 I_c 较难直接测量, 只能通过水量平衡原理间接获得, 而 I_c 的值通常会远小 I_c 的值, 通过 (1) 式获得的 I_c 很容易受观测 I_c 产生的误差影响, 形成相对于均值较大的偏差; 由图 5 可知, 随着降雨量的增加, 截留量均随之增加, 直至 250 min 时, 4 年生 I_c 为 5.25 ± 0.49 mm > 3 年生 3.73 ± 0.65 mm > 2 年生 2.60 ± 0.23 mm > 1 年生 1.93 ± 0.55 mm, 并且 1 年生和 2 年生荆条冠层截留量逐渐趋向稳定, 这是因为荆条枝叶的数量限制了荆条冠层的最大截留量而不能无限增加; 由图 6 可知, 各年龄荆条初始截留量 (25min 时) 为 4 年生 1.39 ± 0.22 mm > 3 年生 1.20 ± 0.33 mm > 2 年生 0.90 ± 0.28 mm > 1 年生 0.68 ± 0.35 mm, 表明随年龄增加, 荆条的截留能力增加, 这可能由于随年龄增加, 荆条冠层形成的结构更利于降雨的拦蓄。

由图 5、6 可知, 随着年龄的增加, 荆条的最大 I_c 逐渐增大, 1 年生与 2 年生荆条差异性不显著, 1 年生与 3 年生、4 年生荆条呈显著差异, 对其变化规律进行拟合, 发现幂指数函数、二项式函数拟合指数大于对数函数, 但考虑到荆条植物本身生长发育规律, 从幼苗生物量较小到成熟期生物量达到稳定最大值, 则截留量变化拟合经验公式对数函数更为合理。250min 后 I_c % 趋向稳定值为 4 年生 21.00% > 3 年生 14.92% > 2 年生 10.25% > 1 年生 8.13%, 但仍在逐渐减少。

通过对降雨量变化和各年龄荆条的 I_c 均值和 I_c % 均值进行回归分析, 发现随着降雨量的增加, 各年龄荆

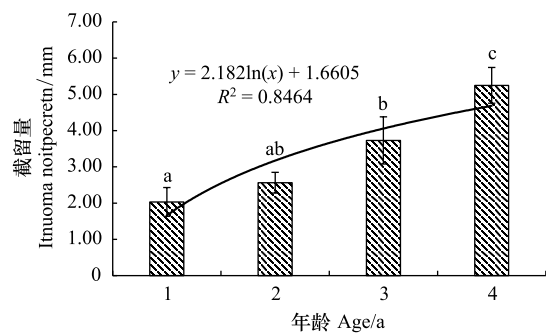


图 5 随年龄增加荆条最大截留量变化规律

Fig.5 The variation of the maximum interception amount of *Vitex negundo* var. *heterophylla* with age

条 I_c 也呈增加趋势, 但增加速率逐渐减小并最终趋向于一个稳定的增加率, 对 I_c 均值和降雨量之间关系进行拟合, 对数函数具有更高的拟合度; 发现随着降雨量的增加, 各年龄荆条 $I_c\%$ 呈逐渐减少的趋势, 幂函数具有较高的拟合度, 拟合优度 R^2 均大于 0.98。分析原因, 荆条地上部分截留雨水量随着降雨的进行会逐渐趋向于饱和, 在达到饱和的过程中, 截留速率逐渐减小。

3.3 I_c 与附加截留量的关系

附加截留量^[4], 即降雨期间蒸发量^[25] (包括雨滴降落、被截留、汇流过程中的蒸散量), 许多研究由于在研究方法或研究目的上的因素, 忽略或是直接包含在某一指标测定上, 并未进行测量。杨宪龙^[26] 将截留量和蒸散量作为一个部分, 即截留损失, 以研究灌丛对降水再分配特征和蒸散特征; 成向荣^[27] 将附加截留量用叶面积指数进行表示, 进行数学模型的修正; 余冬立^[28] 由于研究目的是对冠层截留模型模拟效果的评价, 并没有直接对附加截留量进行观测, 而是拟合方程后进行预测, 最后将附加截留量作为一个参数进行模拟评价, 难以反映附加截留量的变化规律。

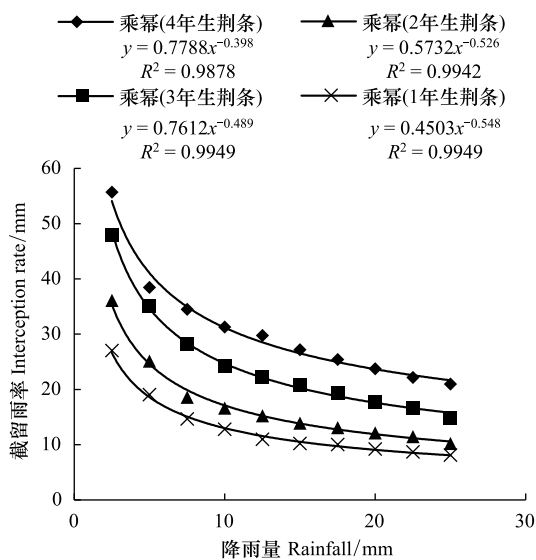


图 6 各年龄荆条截留率随降雨量变化规律

Fig.6 The variation of interception rate of various ages *Vitex negundo* var. *heterophylla* with rainfall

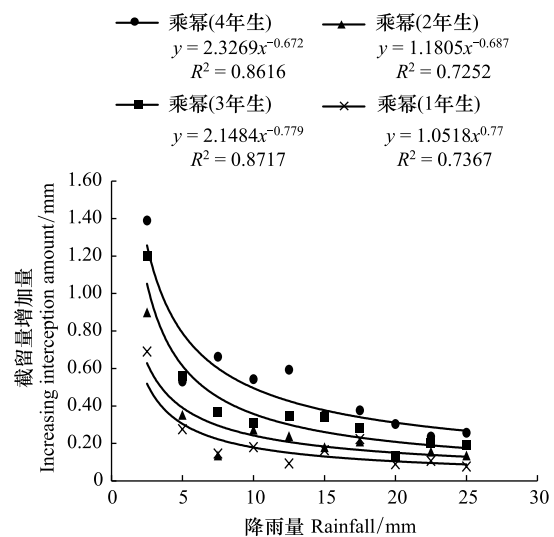


图 7 各年龄荆条截留量增加量随降雨量变化规律

Fig.7 The variation of increasing interception amount of various ages *Vitex negundo* var. *heterophylla* with rainfall

由图 7 可知, 单位时间内 (250 min) ΔI_c 逐渐减小, 并逐渐趋于稳定, 这与赵玉丽^[8] 在人工降雨条件下, 对林冠截留的观测结果一致; 对单位时间内 ΔI_c 和降雨量 (时间) 进行拟合, 发现幂函数的拟合优度较高, R^2 均大于 0.72。赵玉丽研究认为塑料布未充分润湿而导致前期 ΔI_c 较高, 后期 ΔI_c 趋于 0, 本次研究中 1 年生荆条前期 ΔI_c 并没有出现急剧减少, 而且随年龄变化, ΔI_c 有着显著差异 ($p < 0.05$), 说明荆条年龄是影响植株截留能力的主要因素。除此之外, 大部学者认为林冠截留量都有一个极限值。若存在极限值, 则本次实验中 ΔI_c 应该趋向于 0, 而本次研究发现 ΔI_c 逐渐趋于稳定且大于 0, 从间接层面证明了 ΔI_c 的存在。经过对最后三个时间点 (200 min、225 min、250 min) ΔI_c 进行算数平均后计算标准偏差, 得到 4 年生 ΔI_c 稳定值为 0.27 ± 0.03 mm > 3 年生 0.17 ± 0.04 mm > 2 年生 0.14 ± 0.01 mm > 1 年生 0.09 ± 0.02 mm, 即荆条的附加截留量, 即:

$$I_c = I_{c冠} + \text{附加截留量}(I_{c'}) \quad (3)$$

假设在实验期间内, 其他外界条件保持不变, 则 I_c 是一个定值, 对式 (1) 进行修正, 将 (3) 代入式 (1) 中得:

$$I_{c冠} + I_{c'} = P_c - I_{c'} \quad (4)$$

式中: I_c 为截留量, P_c 为林外降雨量, $I_{c'}$ 为未截留量, $I_{c冠}$ 为荆条冠层截留量, $I_{c'}$ 为附加截留量。

4 讨论

(1)关于植被地上部分截留量的研究从19世纪末到现如今,积累了大量的实测数据。常见的研究对象为乔木林分;实验方法为野外自然降雨监测^[15-17,29],即收集一个时间段的次降雨实验数据,然后对其统计处理后建立经验模型或对理论模型的适应性进行评价,存在的问题是,对次降雨的观测所得实验数据,只能单单反映次降雨后植被截留的结果,而不能反映截留过程,且忽略了每次降雨雨强对截留的影响,造成数据间偏差较大。受外界因素影响,同一雨量的两次实验最终观测所得截留量和截留率也是不同的,杨志鹏^[6]在毛乌素沙地相同样地,两次雨量同近的降雨,截留量率为20%—53%左右,截留量0.75—1.7 mm左右,相差较大;半干旱地区与干旱地区的过渡植被,野外截留观测值很可能受附加截留的影响而出现差异,本次研究4年生截留量为 5.25 ± 0.49 mm,与杨志鹏^[6]所测得中雨强度下沙柳截留量1.67 mm相差较大,与王新平^[30]关于柠条截留量 4.3 ± 0.87 mm相差不大。基于此,人工模拟降雨条件下对于降雨截留观测可以通过控制大部分随机变量,人为创造相同或相似立地条件,使误差尽可能减小;人工模拟降雨条件下可以对降雨历程进行全程观测,以详细记录降雨过程中植被地上部分对降雨重新分配过程。

(2)以往大部分研究都未对附加截留量进行研究,分析原因有如下几个方面: I_c 相较于冠层截留更为难以观测,它没有办法直接进行观测,甚至无法间接计算得出; I_c 所占比例较小,如本次研究中测得 I_c 是 I_c 的4.82—14.16倍而 I_c 又是 I_c 的13.52—15.95倍;另一方面, I_c 容易受到其他外界因素(干燥度、温度、风、等)影响,从而产生较大变化,不能将其认为是植物自身对降雨截留能力。本次实验之所以能够通过降雨截留量变化中得出附加截留(I_c)量,是由于7—8月野外人工模拟降雨条件下实验环境往往气温较高,蒸腾量较高,且降雨强度选择为6 mm/h,小于一般人工模拟降雨选择的强度,如赵玉丽^[8]选择的降雨强度为11.58 mm/h、25.91 mm/h、48.40 mm/h、78.48 mm/h;马波等^[31]选择的降雨强度为40 mm/h、80 mm/h。降雨强度太大往往降雨历时短, I_c 的观测值往往更大,在进行水量平衡计算时, I_c 值所占比重则会更小,更加难以观察出其细微变化。

(3)本研究从定量的角度验证了附加截留量的存在,并且通过间接水量平衡计算得到了不同年龄荆条冠层附加截留量的变化规律,由此可以推断,附加截留量与植物本身的生物特征有关。对于一般地区,植被的附加截留量在整个的降雨截留分配过程中所占比例较小,但对于降雨稀少、蒸散量大的干旱和半干旱地区,其对于降雨分配的影响程度较大,故研究植被附加截留量对于干旱区、半干旱区水文过程及植被恢复有着重要意义。

(4)荆条抗旱耐寒,为中旱生灌丛优势种,靠播种或分株繁殖。荆条人工林生长快,能迅速形成植被,呈集群分布。这些荆条的生物学特性导致荆条群落中,个体之间枝叶相互穿插、搭构,形成更为密实的降雨截留层,而荆条的自然更新使得降雨截留层次在垂直空间上得到延展。因此荆条的群落特性可以强化荆条植株的附加截留量,其在降低雨水对土壤击溅侵蚀、水源涵养方面有着优良的表现。对于乔木难以成林的干旱半干旱地区的水土保持有着重要意义。

(5)国内关于荆条水土保持方面的研究主要集中在荆条根系^[11]的分布规律以及与其他灌木根系进行比较,荆条对土壤孔隙度、容重、土壤结构和质地改良作用^[32],荆条冠层各个方位的叶面积指数和透光率^[17]以及荆条抗旱性能^[33-34]的研究,缺少荆条对降雨的截留效应的相关研究,尤其是对于造林难以成活的辽西半干旱低山丘陵区来说,本研究是十分必要的,但本研究在分析荆条年龄对截留变化的影响规律时,虽然对样本植株进行了典型性筛选,但是选取样地的范围在尺度上偏小,在以后的研究中,应处理好实验样地范围尺度与实验变量之间的平衡点,在满足实验科学性的条件下,尽量扩大实验样地尺度。除此之外,本研究仅针对于荆条冠层截留过程及结果进行了分析,今后还应影响荆条冠层截留能力的因素进行研究,以期得到荆条截留降雨的机理,并建立可以进行科学预测的数学模型。

5 结论

(1)辽西低山丘陵区不同年龄荆条冠层未截留量和未截留率变化规律为:未截留量与降雨量均值呈显著

线性正相关,随着荆条年龄的增加未截留量增加速率减小;250 min 后未截留率趋向稳定值随荆条年龄增长而减小,且与降雨量显著正相关,拟合回归方程为对数函数。

(2)荆条冠层截留量和截留率变化规律为:随着降雨量的增加,截留量随之增加,拟合回归方程为对数函数;随着年龄增加,最终截留量稳定值随之增加,拟合回归方程为对数函数;250 min 后截留率趋向稳定值随年龄增加逐渐变小,拟合回归方程为幂指数函数。

(3) I_c = 荆条冠层截留量+附加截留量,对荆条年龄增加,附加截留量值随之增加,这可能与叶表面积随年龄增大而增大有关,降雨期间附加截留量总量为 4 年生 2.7 mm>3 年生 1.7 mm>2 年生 1.4 mm>1 年生 0.9 mm。

参考文献 (References):

- [1] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,熊伟,于澎涛,郭浩. 六盘山华山松 (*Pinus armandii*) 林降雨再分配及其空间变异特征. 生态学报, 2009, 29 (1): 76-85.
- [2] 刘向东,吴钦孝,赵鸿雁. 森林植被垂直截留作用与水土保持. 水土保持研究, 1994, 1(3): 8-13.
- [3] 王彦辉. 刺槐对降雨的截持作用. 生态学报, 1987, 7(1): 43-49.
- [4] 王文,诸葛绪霞,周炫. 植物截留观测方法综述. 河海大学学报:自然科学版, 2010, 38(5): 495-504.
- [5] 王亚蕊,王彦辉,于澎涛,熊伟,杜阿朋,李振华,刘泽彬,任璐,徐丽宏,左海军. 华北落叶松人工林蒸散及产流对叶面积指数变化的响应. 生态学报, 2016, 36(21): 6928-6938.
- [6] 杨志鹏,李小雁,孙永亮,刘连友,张晓影,马育军. 毛乌素沙地沙柳灌丛降雨截留与树干茎流特征. 水科学进展, 2008, 19(5): 693-698.
- [7] 徐先英,严平,郭树江,柴成武. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征. 中国沙漠, 2013, 33(1): 141-145.
- [8] 赵玉丽. 人工降雨条件下林木对截留和产流产沙的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2013.
- [9] 欧阳惠. 森林林冠截留效益计量的研究. 科技通报, 2001, 17(4): 25-31.
- [10] 高婵婵. 黑河上游天老池流域乔木林降雨截留特征的研究[D]. 兰州:兰州大学, 2016.
- [11] 韩烈保,王琼,王晓蓓,辜再元,杜永吉,宋桂龙. 不同立地条件下荆条根系分布规律.应用基础与工程科学学报, 2009, 17(2): 231-237.
- [12] 王英宇,宋桂龙,孟强,辜再元,郭宇. 不同立地条件下野生荆条与胡枝子根系生长特性的比较研究.水土保持通报, 2010, 30(4): 94-98.
- [13] 王晓蓓,韩烈保,刘春霞. 优良水土保持灌木—野生荆条种子发芽实验研究.辽宁林业科技, 2007, (4): 30-32.
- [14] 陈景玲,张冬,王谦,杨喜田,贾长荣,赵勇. 荆条灌丛孤立冠层下不同位置冠层的叶面积指数和透光率分析. 中国水土保持科学, 2014, 12(4): 92-99.
- [15] 王琦,刘丽. 辽西地区水土流失治理经验与治理模式. 水土保持应用技术, 2009, (5): 20-23.
- [16] 雷泽勇,班小峰,吕刚,张景明. 辽西低山丘陵区主要植物种生长状况分析.世界林业研究, 2008, 21(S1): 47-51.
- [17] 张进余. 荆条的生物学特性及其在辽西地区的分布和保护利用价值.现代农业科技, 2017, (2): 122-122.
- [18] 赵荣慧. 半干旱地区造林学.北京:北京农业大学出版社, 1995.
- [19] 刘艳丽,王全九,杨婷,吕金榜,赵光绪. 不同植物截留特征的比较研究.水土保持学报, 2015, 29(3): 172-177.
- [20] 王爱娟,章文波. 林冠截留降雨研究综述. 水土保持研究, 2009, 16(4): 55-59.
- [21] 任世奇. 南亚热带低山丘陵区尾巨桉中龄林水文特征研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2017.
- [22] 中国气象数据网. 中国地面气候示意图(1971—2000)[2018-03-01]. <http://data.cma.cn/data/weatherBk.html>.
- [23] 崔启武,边履刚,史继德,张茂仁. 林冠对降水的截留作用. 林业科学, 1980, 16(2): 141-146.
- [24] Aboal J R, Morales D, Hernández M, Jiménez M S. The measurement and modelling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands. Journal of Hydrology, 1999, 221(3/4): 161-175.
- [25] Horton R E. Rainfall interception. Monthly Weather Review, 1919, 47(9): 603-623.
- [26] 杨宪龙. 黄土高原北部典型灌丛降水再分配特征及其蒸散耗水规律[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- [27] 成向荣,黄明斌,邵明安,虞木奎. 黄土高原农牧交错带人工乔灌木林冠截留.生态学报, 2009, 28(7): 1213-1217.
- [28] 余冬立,刘营营,邵明安,陈友林,彭世彰,周蓓蓓. 黄土坡面不同植被冠层降雨截留模型模拟效果及适用性评价. 农业工程学报, 2012, 28(16): 115-120.
- [29] 时忠杰,王彦辉,熊伟,于澎涛,郭浩,张雷燕,董晓红. 单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性. 生态学报, 2006, 26(9): 2877-2886.
- [30] 王新平,康尔泗,张景光,李新荣. 荒漠地区主要固沙灌木的降水截留特征.冰川冻土, 2004, 26(1): 89-94.
- [31] 马波,马璠,李占斌,吴发启. 模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响.农业工程学报, 2014, 30(16): 136-146.
- [32] 李玉斌. 荆条对辽西地区棕壤改良作用的研究.水土保持应用技术, 2017, (1): 7-9.
- [33] 赵娜,孟平,何雅冰,娄源海,余新晓. 北京山区侧柏-荆条系统水分来源对降雨事件的响应.应用生态学报, 2017, 28(7): 2155-2163.
- [34] 张玥冕. 阜新地区 3 种沙地造林树种的抗旱性比较研究.防护林科技, 2017, (12): 17-19.