

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.03.007

三峡库区天竺桂不同郁闭度下的截留效应

运剑苇^{1,2}, 刘淑婧¹, 张卫华¹, 靳军英¹,
王大可^{3,4}, 常宝⁵, 曾凤铃¹

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 天津市中水科技咨询有限责任公司, 天津 300170;
3. 重庆两江源环境影响评价有限公司, 重庆 401120; 4. 中冶赛迪重庆环境咨询有限公司, 重庆 400014;
5. 重庆市涪陵区水利局, 重庆 涪陵 408000

摘要: 为了探究三峡库区天竺桂对紫色土坡地降雨的截留作用, 采用室内人工模拟降雨装置, 分析天竺桂不同冠层郁闭度条件下紫色土坡地降雨径流与截留的情况。结果表明, 林冠层的截留作用有助于雨水下渗, 减少径流。一定郁闭度条件下, 截留率随降雨量增加而持续降低, 但在降雨量较高时降低幅度减小; 截留容量与郁闭度和叶面积指数分别呈指数正相关和线性正相关; 林冠截留量随降雨量的增大出现快速增加—缓慢增加—稳定不变的现象, 两者关系符合模型: $I_c = a \cdot \exp(-b \cdot P) + c$ (I_c 为林冠截流量, P 为降雨量, a, b, c 为参数); 根据试验结果改进的包含郁闭度因子 C 的模型 ($I'_c = a \cdot \exp(-b \cdot PC) + c \cdot C$) 拟合精度较高, 能更好地反映天竺桂冠层截留效应与郁闭度和降雨量之间的规律。

关键词: 林冠郁闭度; 降雨; 径流; 截留; 模型

中图分类号: S715.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2021)03-0045-08

植被林冠层影响降雨在森林生态系统中的分配。近年来, 人们对林冠截留的研究大都集中在野外条件下通过实测林外雨量与林内穿透雨及枝干径流等方法来研究林冠截留特征^[1-3]。在林冠层的作用下, 森林降雨先被树体表面截留, 再到达土壤表面, 在此过程中降雨部分蒸发^[4]。雨水落至林冠层, 其动能被枝叶削减, 地表水流速度降低, 土壤下渗能力得到提高^[5-6]。影响林冠截留的因素有很多, 如降雨特征、郁闭度、林冠结构、雨前枝叶干燥程度和树木种类等, 为了反映这些因子对截留量的影响规律, 很多专家学者尝试建立截留量与若干影响因子的回归方程, 但研究结果不尽相同^[7-9]。此外, 亦有研究将林冠截留与水土保持相联系, 探究林冠郁闭度、降雨量等对径流产生与土壤侵蚀的影响^[10-11]。截至目前, 关于林冠截留的研究对象也各有不同, 如油松林^[12-13]、樟子松林^[14]、灌木^[15]、草本植物^[16]等, 都具有很强的地域特色。

天竺桂(*Cinnamomum japonicum* Sieb.)为樟科樟属亚热带常绿乔木, 幼年期耐阴, 喜温暖湿润气候, 在排水良好的微酸性土壤上生长最好, 中性土壤亦能适应。具有长势强、主根发达、耐水湿、根深固沙、抗风保土、抗烟尘、抗二氧化硫等特性, 加上树姿优美, 常被用作绿化树种, 也是良好的用材林和防护林造林树种^[17]。

三峡库区属太平洋季风气候, 雨量丰富但时空分布不均, 夏季降雨最多, 春秋次之。当地紫色土分布广泛, 多丘陵山地, 容易发生水土流失。近年来大规模人工种植天竺桂, 因此探究该树种对降雨的截留效应很有必要。但迄今为止, 人们主要是研究天竺桂的造林、管护及其利用技术, 包括育苗、病害防治和生物

收稿日期: 2019-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671291); 重庆市社会民生类重点研发项目(cstc2018jcsx-mszdX0052); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2019F002)。

作者简介: 运剑苇, 硕士, 主要从事土壤物理学研究。

通信作者: 张卫华, 副教授。

成分提取等,对天竺桂的降雨截留作用研究甚少.本研究以紫色土模拟下垫面,通过人工模拟降雨,研究天竺桂不同林冠郁闭度对产流以及截留的影响,为防治紫色土区的坡面侵蚀提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤:三峡库区具有代表性的中性紫色土,采自重庆市北碚区西南大学紫色土试验基地,其成土母质为中生代侏罗系沙溪庙组(J_2S)灰棕紫色沙泥岩,在国际土壤系统分类中归属于锥形土^[18-19]. pH 值 6.50,容质量 1.35 g/cm^3 ,饱和含水量 396.7 g/kg ,按照国际制土壤质地划分标准属于粉砂质壤土,粘粒、粉粒和砂粒质量分数依次为 73.7,461.5,464.8 g/kg . 土样采集深度 30 cm,拣去杂物,自然风干,过 10 mm 筛备用.

供试植被:不同部位天竺桂树枝,采自重庆市北碚区西南大学林学试验基地,枝叶生长良好,分布均匀,植株高度 0.4 m,叶面积各不相同,具有代表性.

1.2 试验设计

在室内微型试验小区环境下,采用人工模拟降雨装置进行试验,根据中国科学院水利部西北水土保持研究所建立的土壤侵蚀人工模拟降雨系统技术指标,设置下喷式喷头,距地面高度为 2.5 m,由计算机控制降雨历时,由管道泵、缓冲罐、电磁阀、远传压力表控制供水压力、降雨强度,可模拟雨强范围 $0.2\sim 2.23\text{ mm/min}$. 根据三峡库区降雨丰沛,且多短历时、高强度暴雨的特点,确定试验雨强为 0.75 mm/min ^[20]. 试验前率定两次相邻雨强误差不超过 5%、降雨均匀度达到 90% 以上. 正式降雨前,先设置雨强 0.38 mm/min 的裸坡预降雨,至坡面开始产流停止,以保证每次试验前期土壤含水率一致. 静置 24 h 后插上树枝,再进行正式降雨试验.

用长 \times 宽 \times 高=2 m \times 1 m \times 0.32 m 的钢制土槽装填土壤模拟下垫面,土槽底部密封,侧面带有地表径流出水口. 采用分层装填法控制模拟槽内土壤容质量为 1.35 g/cm^3 ,将土壤均匀填装进土槽,每 5 cm 一层,边填边压实,以减小边壁对入渗、产流、产沙过程及坡面侵蚀的微形态发育等诸多方面的影响,并使下垫面土壤条件的变异性最小. 土槽坡度采用三峡库区坡耕地较常见的 15° . 试验装置如图 1 所示.

试验于 2018 年 3 月 15 日至 4 月 13 日在西南大学资源环境学院水文与水资源实验室内进行. 采用 5 枝不同的天竺桂树枝模拟 5 种林冠郁闭度,CK 为对照试验(裸坡地),共 6 个处理,3 次重复. 记录各场次降雨产生的径流量以及林冠截留量,建立不同郁闭度条件下林冠截留量随降雨量变化的截留模型,再引入郁闭度因子,对模型进行改进.



图 1 试验装置图

1.3 测定项目及方法

稳定径流强度:径流样品稳定后,用量筒测得的每分钟采集的径流量.

林冠郁闭度与叶面积指数(LAI):采用树冠投影法,树冠在坡面上的投影面积与坡面面积比值即为林冠郁闭度;测定叶面积指数时,将树枝树叶摘下计算叶片数,选取一片具有代表性的标准叶片,采用质量比例法计算树叶总面积,树冠叶片总面积与树冠投影面积之比即为叶面积指数^[21].

林冠截留量:采用称质量法(利用泡沫板对水吸附能力弱的特点,移动树枝前将其小心放在树冠下,接住移动过程中不慎掉落的雨水),通过树枝降雨前后的质量差值来确定截留量.计算公式如下:

$$I = 10 \frac{M_1 + M_3 - M_2 - M_4}{\rho \cdot T} \quad (1)$$

式中: I 为树冠截留量(mm); M_1 为降雨后树枝的总质量(g); M_2 为降雨前树枝的总质量(g); M_3 为降雨后泡沫板的总质量(g); M_4 为降雨前泡沫板的总质量(g); ρ 为水的密度(1.0 g/cm^3); T 为树冠投影面积(cm^2).

1.4 数据处理

采用 Excel(2013), OriginPro(8.0) 和 MATLAB(2015b) 对试验数据进行计算及模型拟合.

2 结果与分析

2.1 林冠郁闭度与叶面积指数

在人工模拟降雨截留试验中,6种处理下的树冠投影面积、相对应叶面积指数和林冠郁闭度如表1所示.

表1 6种覆盖模式下的投影面积及叶面积指数和林冠郁闭度

处理	代码	树冠投影面积/ m^2	叶面积指数	郁闭度
CK	C_0	0	0	0
1	C_1	0.565 6	0.60	0.282 8
2	C_2	0.729 4	0.71	0.364 7
3	C_3	0.903 8	0.86	0.451 9
4	C_4	1.134 3	1.34	0.567 2
5	C_5	1.321 8	2.12	0.660 9

经过分析发现,林冠郁闭度和叶面积指数呈正相关,两者符合对数函数关系:

$$y = 0.291 6 \ln x + 0.463 2 \quad (2)$$

式中: x 为叶面积指数; y 为林冠郁闭度; $R^2 = 0.968 9$.

2.2 林冠郁闭度对径流与下渗的影响

植被对降雨产流的影响十分复杂,不同植物的生长过程、不同土地利用情况以及不同土质的降雨产流规律均有很大差异^[22-23].本试验以裸露坡面为对照,进行降雨产流试验.径流强度达到稳定时,不同郁闭度条件下的截留量已达到最大值,此时降雨只分为地表径流和下渗两部分,由试验得出不同郁闭度条件下的稳定径流强度,结果如表2所示.

表2 不同郁闭度条件下的稳定径流强度

处理	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
郁闭度/%	0	28.28	36.47	45.19	56.72	66.09
稳定地表径流强度/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	0.40	0.37	0.33	0.30	0.22	0.19

用 OriginPro (8.0) 对试验结果进行处理,发现稳定地表径流强度与郁闭度呈抛物线关系:

$$y = -5.01 \times 10^{-5} x^2 - 6.48 \times 10^{-5} x + 0.402 4 \quad (3)$$

式中: x 为郁闭度; y 为稳定地表径流强度; $R^2 = 0.973 8$.

由于截留量达到最大值时,降雨只转化为地表径流和下渗两部分,由表2可知稳定地表径流强度随林冠郁闭度的增加而降低,所以稳定下渗率随郁闭度的增大而增加.5种林冠层覆盖条件下的稳定地表径流强度比对照分别减少了7.29%,17.09%,25.13%,47.53%和52.76%.

2.3 林冠郁闭度对截留的影响

影响植物截留的因素比较复杂,植物的实际截留量应包括冠层枝叶对雨水的吸附量和雨期蒸发引起的附加截留量.本试验是在室内无风条件下进行的,空气湿度较大,降雨历时较短,故可不考虑林冠截

留水分的蒸发.

2.3.1 林冠截留量与降雨量

林冠截留能力是指在理想条件下林冠枝叶对任意降雨量的最大吸附量,随降雨量的增加而增加.当降雨量足够大时,林冠截留能力就等于林冠截留容量.所以,林冠截留容量是林冠截留能力的最大值,也是理想状态下的林冠截留量^[24-25].每次降雨结束后计算截留量,其截留量随降雨量的变化如图 2 所示.截留量随降雨量的变化大致分为 3 个阶段:快速增长阶段、缓慢增长阶段和稳定阶段.从降雨开始至 0.75 mm 左右,即降雨时长 1 min 左右时,5 种郁闭度条件下的截留量均呈快速增长趋势;对于处理 C₄ 和 C₅,降雨量达到 0.75 mm 之前,林冠层截留量急剧增长;之后,降雨量从 0.75 mm 增大到 3 mm 时,截留量增长速度较为缓慢;当降雨量超过 3 mm 后,截留量逐渐趋于稳定,该 2 种处理的截留容量分别为 0.13 mm 和 0.20 mm.处理 C₁,C₂ 和 C₃ 的郁闭度条件下,其变化规律基本相同,在降雨量为 1.8 mm 左右时,截留量均达到最大值(0.06,0.08 和 0.09 mm);此后均在较小的范围内波动.

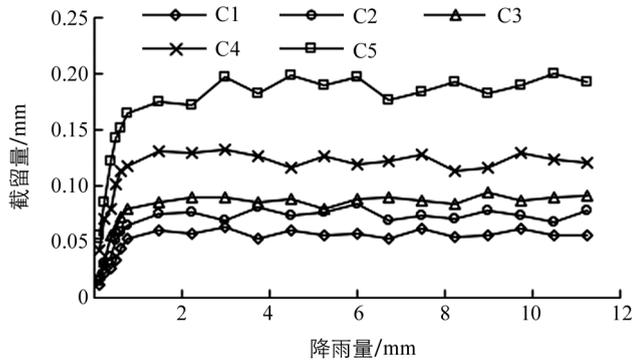


图 2 5 种郁闭度下林冠截留量随降雨量的变化

截留容量随林冠郁闭度变化的趋势如图 3 所示.由图 3 可知,林冠截留容量随着郁闭度的增加而增大,且决定系数较高.在郁闭度从 28.28%变化至 45.19%时,坡面郁闭度增加了 16.19%,截留容量增加了 0.02 mm;郁闭度从 45.19%增大至 56.72%时,郁闭度增幅 11.35%,截留容量增大了 0.04 mm;郁闭度从 56.72%增大至 66.09%时,坡面郁闭度增加了 9.93%,而截留容量增大了 0.07 mm.由此可见,高郁闭度条件下的截留容量的增幅较大,低郁闭度条件下截留容量的增幅较小.

叶面积指数与截留容量的关系如图 4 所示.截留容量随着 LAI 的增大而增大,两者呈线性正相关,且相关性很高.

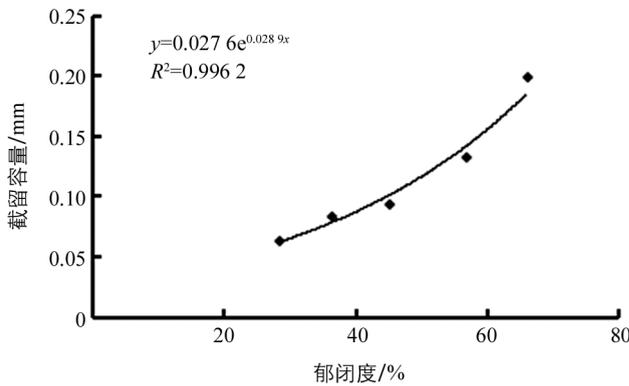


图 3 截留容量与郁闭度的关系

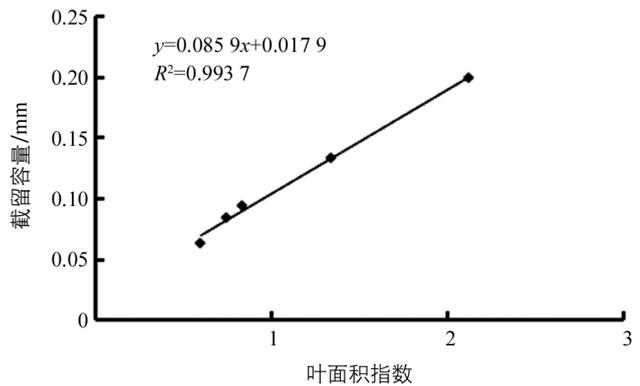


图 4 截留容量与叶面积指数的关系

2.3.2 不同郁闭度条件下截留率随降雨量的变化

林冠截留率是林冠截留量与降雨量的比值,各处理郁闭度条件下截留率随降雨量的变化如图 5 所示.由图可以看出,林冠截留率随降雨量的增加先是快速降低,然后缓慢降低.降雨量为 1.5 mm 时的 5 种郁闭度条件下的截留率较 0.13 mm 时分别减少了 5.57%,7.02%,11.06%,25.67%和 33.12%;而降雨量从 1.5 mm 增加至 3.8 mm 时,5 种郁闭度条件下的截留率分别比 1.5 mm 时减少了 2.6%,2.84%,3.44%,4.38%和 6.81%.降雨量相同时,郁闭度越高,截留率越大,在降雨初期,5 种郁闭度条件下的截留率差别较为明显,当降雨量为 0.13 mm 时,各处理郁闭度的截留率分别为 9.6%,12%,16.8%,34.4%和 44.8%.随着降雨量的增大,5 条曲线的走势越来越重合,截留率的值趋于相同且趋近于 0.

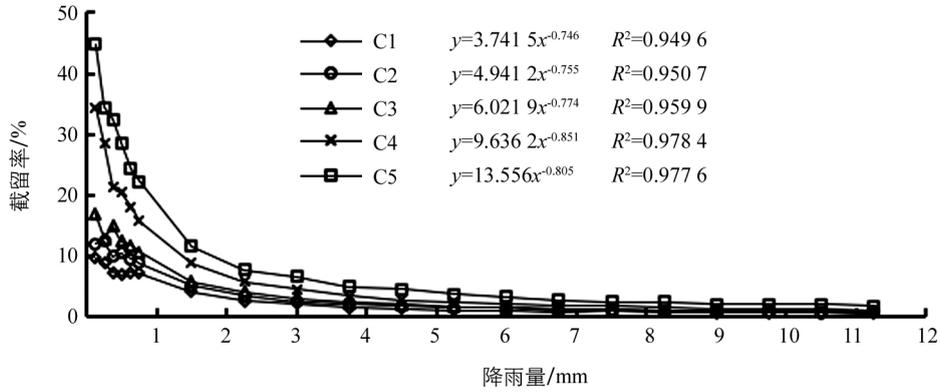


图 5 林冠截留率随降雨量的变化

2.4 截留模型拟合

根据本试验所得数据, 运用 MATLAB(2015b)对试验数据进行曲线拟合, 发现 5 种郁闭度条件下的截留量与降雨量的关系符合模型:

$$I_c = a \cdot \exp(-b \cdot P) + c \tag{4}$$

式中: I_c 为林冠截流量; P 为试验降雨量; a, b, c 为模型参数, 具体结果如表 3 所示.

表 3 各郁闭度条件下的截留模型

郁闭度/ %	拟合模型	参 数			R^2
		a	b	c	
28.28	$I_c = -0.06549 \exp(-2.382P) + 0.05826$	-0.0655	2.3820	0.0583	0.9417
36.47	$I_c = -0.08456 \exp(-2.53P) + 0.07531$	-0.0846	2.5300	0.0753	0.9509
45.19	$I_c = -0.1004 \exp(-2.812P) + 0.08842$	-0.1004	2.8120	0.0884	0.9723
56.72	$I_c = -0.1267 \exp(-3.37P) + 0.1245$	-0.1267	3.3700	0.1245	0.9393
66.09	$I_c = -0.187 \exp(-2.64P) + 0.1888$	-0.1870	2.6400	0.1888	0.9625

上述截留模型只是反映了某个郁闭度条件下截留量随降雨量的变化趋势, 虽然精度较高, 但是没有把林冠郁闭度对截留的影响反映在模型中, 所以对于这 5 种郁闭度条件以外的情况不能进行较好估算. 因此, 在得到 5 种郁闭度条件下的截流模型之后, 借鉴党宏忠等^[26]在青海云杉林冠截留与降水、林分郁闭度间的关系研究中构建包含林分郁闭度因子的改进模型方法, 引进林冠郁闭度因子, 在不改变原模型结构的前提下构建新的模型:

$$I'_c = a \cdot \exp(-b \cdot PC) + c \cdot C \tag{5}$$

式中: I'_c 为林冠截流量; P 为试验降雨量; C 为林冠郁闭度; a, b, c 为模型参数, 林冠截流量利用试验数据拟合结果如表 4 所示, 包含郁闭度因子的模型对试验数据的拟合效果如图 6 所示.

表 4 包含郁闭度因子的改进模型

模 型	参 数			R^2	SSE	RMSE
	a	b	c			
$I'_c = -0.0957 \exp(-4.961PC) + 0.2486C$	-0.0957	4.9610	0.2486	0.8648	0.0312	0.0197

由表 4 可得, 改进后的模型决定系数为 0.8648, 标准差为 0.0179, 拟合精度仍然较高; 从图 6 也可以看出, 试验数据较为均匀地分布在改进模型拟合的数据面上. 所以, 该模型在保证精度的前提下, 能更全面地反映不同郁闭度和降雨量条件下天竺桂林冠层的截留效应.

3 结 论

5 种郁闭度条件下, 稳定地表径流强度分别为 0.37, 0.33, 0.30, 0.22, 0.19 mm/min, 较空白对照分别减少了 7.29%, 17.09%, 25.13%, 47.53% 和 52.76%. 林冠层的截留作用有助于雨水下渗, 减少径流, 降低森林水土流失. 郁闭度越高, 其减流效果越好, 越有助于防治降雨引起的土壤侵蚀.

林冠截留量随降雨量的增大, 其变化分为 3 个阶段: 快速增加—缓慢增加—稳定阶段; 截留容量与郁

闭度和叶面积指数分别呈指数正相关和线性正相关; 5 种郁闭度条件下, 截留率与降雨量呈幂函数关系。

5 种郁闭度条件下建立的截留模型拟合效果很好, 而包含郁闭度因子 C 的改进模型 ($I_c = -a \cdot \exp(-b \cdot PC) + c \cdot C$) 决定系数为 0.864 8, 标准差为 0.017 9, 拟合精度仍然较高, 能更全面地反映三峡库区天竺桂不同郁闭度和降雨量下冠层的截留效应。

4 讨 论

降雨、植被、地形、土壤特性等

都会对水土流失造成一定的影响^[27], 其中降雨是水土流失的原动力, 雨滴打击地表造成土壤颗粒分离, 被降雨形成径流搬运, 最终导致土壤侵蚀, 且诸多研究表明地表径流量与降雨量呈正相关^[28-30]。植被向来是治理水土流失的首要选择, 其林冠层能削减雨滴动能并截留降雨, 其茎及落叶对径流流速起到减缓作用, 根系能够改良土壤结构, 改变土壤水分垂直运动通道和过水断面, 增加土壤中的孔隙量^[31], 增加水分入渗, 这些都能够直接或间接地减少径流, 从而减少水土流失。树枝林冠层与根系对水土流失的控制作用是不同方面的, 本试验主要研究的是天竺桂林冠层对截留的影响, 降雨过程中, 林冠层的作用相当于一层屏障, 可缓冲降雨强度, 冠层郁闭度越高, 就会有越多的雨水被削减动能、被截留及下渗, 径流的产生也越少, 对于坡面土壤起到很好的防护作用, 对水土流失的控制也有好处。

降雨前期, 枝叶比较干燥, 在降雨发生后的一段时间, 雨水吸收速度较快, 截留量增幅较大, 随着枝叶湿润程度的增加, 吸水速率逐渐变慢, 当枝叶达到饱和时, 截留量稳定, 因此, 在一定郁闭度条件下, 截留量随着降雨进行, 会经历快速增加、缓慢增加、保持稳定 3 个阶段, 其他专家学者也有相同的研究结果^[32-33]。截留率是某一时段内的截留量与此时段降雨量的比值 I_c/P , 在降雨强度一定的情况下, 降雨量随降雨历时线性增长, 而截留量的增幅则随着枝叶湿润程度的增加而逐渐降低, 此种情况下, 截留率也逐渐降低。

目前, 关于截留容量的测定方法包括人工降雨法和吸水法, 吸水法测定简单易行, 但其是一种理想状态下的林冠可吸附水量^[34], 而人工降雨法与之相比更能反映真实的截留特征, 并且在多次实验后也能根据测定的不同降雨量对应的截留量来确定截留容量, 更具真实性。根据试验结果, 对截留容量与郁闭度和叶面积指数进行相关性拟合, 发现截留容量与林冠郁闭度呈指数关系, 与叶面积指数呈线性正相关, 此结果与杨中文等^[22]、曾德慧等^[35]的模拟实验结果一致。郁闭度较小时, 随着郁闭度的增加, 截留容量的增幅较小; 而在郁闭度较大的情况下, 随郁闭度的增加, 截留容量的增幅较大。本试验截留量达到稳定状态时, 并不是一个固定的值, 而是在一个范围内变动, 这可能是由于在降雨过程中, 雨滴对树枝有一定的打击作用, 使树叶的角度发生变化, 从而使树叶的截留作用也发生改变, 所以截留量的波动在雨强和降雨方向不变的情况下, 可能与树叶的承重面走向和承重能力有关, 而对于其具体的影响机理, 还需要进一步研究。

本研究的截留模型是在经验模型的基础上通过试验数据拟合而成的半经验半理论模型, 此类模型具有较强的实用性, 研究应用较多。张焜等^[32]、田凤霞等^[36]的研究都表明其他影响因素相近的条件下, 截留量与降雨量存在正相关关系, 本研究结果与此类研究基本一致。Rutter 等^[37]利用水量平衡原理考虑了降雨期间蒸发带来的附加截留量来建立模型, 本研究建立的模型由于降雨历时短, 未考虑附加截留量的影响, 对于历时长降雨, 可采用降雨期间蒸发强度及降雨历时资料扣除附加截留量即可。通过试验数据建立的不同郁闭度条件下的天竺桂截留模型拟合效果较好, 建立的包含郁闭度因子的改进模型精确度亦较高, 对天竺桂的截留情况具有很好的模拟效果。

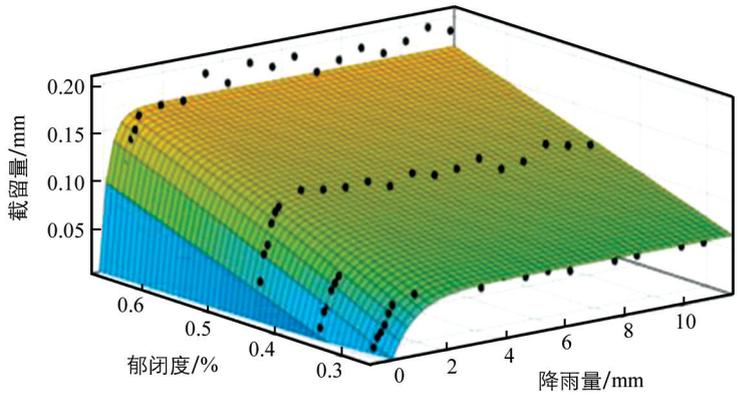


图 6 改进模型的拟合效果图

参考文献:

- [1] 徐丽娜,管清成,赵忠林,等. 长白山两种林型的降雨截留再分配特征与修正的 Gash 模型模拟 [J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(3): 44-48.
- [2] 王云霓,王晓江,高孝威,等. 内蒙古大青山典型森林植被水文功能研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(10): 191-196.
- [3] 裴承敏,王云琦,张守红,等. 重庆缙云山毛竹林次降雨再分配特征及穿透雨的空间异质性 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 202-207.
- [4] 余新晓,张志强,陈丽华,等. 森林生态水文 [M]. 北京:中国林业出版社, 2004.
- [5] ROBICHAUD P R. Fire Effects on Infiltration Rates after Prescribed Fire in Northern Rocky Mountain Forests, USA [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231: 220-229.
- [6] HARDEN C P, SCRUGGS P D. Infiltration on Mountain Slopes: a Comparison of Three Environments [J]. Geomorphology, 2003, 55(1): 5-24.
- [7] 陈丽华,张 艺,余新晓,等. 北京山区典型森林植被林冠截留特征及模拟 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 423-431.
- [8] 周 彬,韩海荣,康峰峰,等. 大岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 [J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1645-1653.
- [9] 郝 帅,张毓涛,刘 端,等. 不同郁闭度天山云杉林林冠截留量及穿透雨量特征研究 [J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 917-923.
- [10] NIWAT R, 王基柱. 林冠郁闭度对水土流失的影响 [J]. 中国水土保持, 1984(7): 58-60.
- [11] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响 [J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26.
- [12] 卢俊峰,马钦彦,刘世海,等. 北京密云油松人工林林冠降水截留特征研究 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(S2): 129-132.
- [13] 王晓燕,鲁绍伟,杨新兵,等. 北京密云油松人工林林冠截留模拟 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 85-91.
- [14] 刘 亚,阿拉木萨,曹 静. 科尔沁沙地樟子松林降雨再分配特征 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2046-2055.
- [15] 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.
- [16] 霍炜洁,周怀东,刘玲花,等. 土壤-植物系统对径流污染物截留的影响因子分析 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 798-804.
- [17] 龚子同,陈志诚,张甘霖. 世界土壤资源参比基础(WRB): 建立和发展 [J]. 土壤, 2003, 35(4): 271-278.
- [19] 翁昊璐,慈 恩,连茂山,等. 重庆市酸性紫色土成因及其对发生分类的意义 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(9): 32-39.
- [20] 江 东,卢喜平,蒋光毅,等. 降雨因素对紫色土坡地土壤侵蚀影响的试验研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 140-144.
- [21] 李元寿,王根绪,王一博,等. 长江黄河源区覆被变化下降水的产流产沙效应研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 616-623.
- [22] 杨中文,唐甜华,陈 野,等. 樟树林冠截留模拟试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2011, 28(3): 5-9, 49.
- [23] 姚文艺,肖培青,申震洲,等. 坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系 [J]. 水利学报, 2011, 42(12): 1438-1444.
- [24] 宋丹丹. 林冠对降雨截留作用的研究 [D]. 泰安:山东农业大学, 2015.
- [25] 范世香,高 雁,程银才,等. 林冠对降雨截留能力的研究 [J]. 地理科学, 2007, 27(2): 200-204.
- [26] 党宏忠,周泽福,赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 60-64.
- [27] 万 丹,何财基,王玉民,等. 藏东南高寒区尼洋河谷地带不同土地利用方式土壤抗蚀性研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(9): 106-114.
- [28] 王子臣,邱 丹,堵燕钰,等. 太湖流域典型菜地地表径流及氮磷流失特征 [J]. 江苏农业学报, 2012, 28(6): 1501-1504.
- [29] 郑 伟,王中美. 贵州喀斯特地区降雨强度对土壤侵蚀特征的影响 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 333-339.
- [30] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等. 模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 23-26, 84.
- [31] 孙佳美,余新晓,樊登星. 模拟降雨条件下黑麦草对土壤水分入渗的影响 [J]. 土壤, 2014, 46(6): 1115-1120.

- [32] 张焜, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山暖性针叶林林冠截留及其影响因素 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 32-35.
- [33] 王安志, 刘建梅, 裴铁璠, 等. 云杉截留降雨实验与模型 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 38-42.
- [34] 刘艳丽, 王全九, 杨婷, 等. 不同植物截留特征的比较研究 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 172-177.
- [35] 曾德慧, 裴铁璠, 范志平, 等. 樟子松林冠截留模拟实验研究 [J]. 应用生态学报, 1996, 7(2): 134-138.
- [36] 田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 等. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素 [J]. 生态学报, 2012, 32(4): 62-72.
- [37] RUTTER A J, KERSHAW K A, ROBINS P C, et al. A Predictive Model of Rainfall Interception in Forests, 1. Derivation of the Model from Observations in a Plantation of Corsican Pine [J]. Agricultural Meteorology, 1971, 9: 367-384.

Interception Effect of Different Canopy Closures of *Cinnamomum japonicum* in the Three Gorges Reservoir Area

YUN Jian-wei¹, LIU Shu-jing¹, ZHANG Wei-hua¹, JIN Jun-ying¹,
WANG Da-ke^{3,4}, CHANG Bao⁵, ZENG Feng-ling¹

1. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Tianjin Zhongshui Science and Technology Consulting Co. Ltd., Tianjin 300170, China;

3. Chongqing Liangjiangyuan Environmental Impact Assessment Co. Ltd., Chongqing 401120, China;

4. CMCC Chongqing Environmental Consulting Co. Ltd., Chongqing 400014, China;

5. Chongqing Fuling District Water Conservancy Bureau, Fuling Chongqing 408000, China

Abstract: In order to provide a theoretical basis for slope erosion research in purple soil areas and a practical guide for regional water resources management, a laboratory study was made in which the artificial rainfall simulator was applied to explore the interception effect of *Cinnamomum japonicum* on the purple soil slope land of Three Gorges Reservoir area and to analyze the rainfall runoff and interception of purple soil slope under different conditions of forest canopy closure. Experiment results showed that the canopy contributed to the infiltration of rainwater, hence reducing the generation of runoff. Under certain canopy closure, canopy interception rate steadily decreased with increasing rainfall, and the extent of decrease diminished with greater rainfall. With increasing rainfall, canopy interception rate rapidly increased first, then it increased slower and finally became stable. The interception rate decreased with the increase of rainfall, and the speed would be slower and slower. Their relationship could be expressed as $I_c = a \cdot \exp(-b \cdot P) + c$ (I_c), where I_c refers to canopy interception rate, P is rainfall and a and b are parameters. Based on the results of the experiment a modified model was constructed ($I'_c = a \cdot \exp(-b \cdot PC) + c \cdot C$), which contained the factor of closure and, therefore, could better reflect the relationship between canopy interception rate and canopy closure of *C. japonicum* and rainfall. Maximum interception was exponentially related to canopy density, and was in a positive linear correlation with leaf area index.

Key words: forest canopy closure; rainfall; runoff; interception; model