

刺槐对降雨的截持作用*

王彦辉

(中国林业科学院林业研究所)

摘 要

基于林冠截持和干流现象的物理机制, 通过进行一些假设简化, 建立了刺槐单株林木的林冠截持量和干流量的模型, 并对它们的应用简单地提出了建议。

降雨通过林冠层后, 不但在降雨雨滴大小分布及降落速度、动能等性质上发生了变化, 而且在组成成分上也发生了变化, 即表现为产生直接穿透雨、林冠滴下雨滴和溅落雨滴、产生林冠截持和干流等现象。具有不同结构特征的分在不同特点的降雨条件下所产生的林冠截持量和干流量的大小变化规律, 不论对于研究森林的物质循环和水分循环, 还是对于研究水土流失规律及不同结构森林的水土保持效益来说, 都是必不可少的。但这些研究目前一般还都停留在半定量或纯粹的经验方程水平上, 并不能很好地反映出这些现象的物理机制和各种现象随时间的变化过程, 因此, 其预报计算精度就不可能很高, 在应用时也就不可能不受到极大的限制。本文是在林冠截持和干流现象的物理机制基础上, 同时为计算和应用方便而做出了一些简化和假设, 采用对单株林木的相应实测数据进行回归分析和拟合计算而确定一些参数的方法, 建立了林冠截持和干流量的数学模型。

一、研究地区的基本情况

本研究是于1983年7月至1984年10月在甘肃省泾川县官山水保站进行的。该县地处陇东黄土高原, 位于东经 $107^{\circ}15'$ 至 $107^{\circ}45'$ 、北纬 $35^{\circ}10'$ 至 $35^{\circ}31'$, 海拔高度930至1,462米, 年平均气温 10°C , 年雨量549.9毫米, 年内降雨分配不均, 尤其是暴雨集中出现在6至8月, 植被类型为森林草原过渡地带。官山水保站所在中沟小流域内塬面土壤为粘黑垆土或黄绵土, 但在沟道内因强烈的冲刷侵蚀作用而黄土母质直接裸露。流域内人工林以刺槐占绝对优势, 现林龄多为7至11年, 由于林冠郁闭, 林下草本植物的种类和数量都很少, 林下枯枝落叶层受人为活动影响不大, 一般地表覆盖度都在50%以上。

二、基本研究方法

本研究曾先后选择了大小不同的21株树木进行单株树木的干流量和林冠截持量观测。

* 本文是作者在北京林业大学阎树文副教授指导下所做硕士论文中的部分内容, 外业实习期间曾得到甘肃省平凉地区水保站孙尚海工程师等同志的大力协助; 本文曾蒙本所马雪华老师审阅, 在此一并表示感谢。

用 4 至 6 个承雨面积为 240 平方厘米的圆形塑料筒做为承雨器均匀布设于树冠半径一半处的圆周上, 并注意适当考虑树木枝叶的疏密情况和避开枝叶滴水集中的地方, 以其承雨量的平均值做为观测树木树冠投影面积内的林下降雨量的平均值(梁建民等, 1980)。为减小降雨过程中风、蒸发、雨滴击溅、承雨面积大小及其他一些因素影响所造成的误差, 在空旷地自记雨量计附近也同样放置 4 个承雨器, 根据每次降雨中其平均承雨体积和自记雨量计所记录的空旷地降雨深度校正每次降雨中承雨器的承雨面积。

用缠于树干上的塑料管将干流导至水筒中, 雨后勤取干流总体积并除以冠幅面积得树冠投影面积范围内的平均干流深度。

进行雨量平衡计算, 可推求出每次降雨中林冠截持降雨的平均深度。

用测杆量测每木树高、冠层厚。用胸径卡尺量测每木胸径。用皮卷尺量测每木冠幅 8 个方位的半径, 然后计算出每木树冠水平投影面积。

林冠纯郁闭度用测点法观测求出, 它为所有测点中不透光点所占比例, 反映了树冠真正的遮蔽程度, 这点是不同于一般常用的郁闭度概念的。每隔 1 月左右时间或林冠纯郁闭度有明显变化时测定 1 次, 调查日期之间的数值可根据观测数值通过非线性内插求得。

对调查期间内各场降雨的起止时间和历时, 与前次降雨的相隔天数、降雨总量等特征进行分析统计。

三、研究结果和分析

一般认为, 林冠截持量大小取决于降雨量、降雨历时等降雨特性和林冠厚度、层次、郁闭度等林冠特性及雨前林冠的湿润程度和降雨过程中的蒸发强度。林冠对降雨的截持是由两部分组成的, 一部分为“枝叶吸附量”, 另一部分为因降雨过程中枝叶上附着的水不断蒸发而增加的“附加截持量”(崔启武等, 1980)。对于短历时降雨, 因降雨过程中蒸发强度很小故附加截留量亦很小, 但对于长历时降雨或间歇性降雨的林冠截持量计算, 附加截持量则起着不可忽视的作用。这个基本概念可以表达为(中野秀章, 1976):

$$I_c = S_c + \hat{e} r T \quad (1)$$

式中: S_c ——枝叶吸附量

$\hat{e}$ ——树冠投影面积内水湿树体表面的平均蒸发强度

r ——水湿树体表面积与树冠投影面积的比值

T ——降雨历时

I_c ——林冠截持量

虽然上式的物理意义明确, 但未见在实际中应用, 这是因为式中所包含的参数非常难以确定。例如, 枝叶吸附量并不是一个常数, 它会随林冠特性和降雨之前林冠湿润状况不同而变化。水湿树体表面积的确定也并非易事。水湿树体表面的蒸发强度也并非常数, 也是随气象条件和所在树冠中的位置不同而变化的。对于一般常见的简单的统计模型, 又因物理意义不甚明确而不能用于精确描述林冠截持量在降雨过程中的变化和反映出具有不同结构特点的林冠在不同降雨条件下的林冠截持量差异。因此, 我们有必要从实用的角度出发, 在做出一些简化假设后, 建立一个物理意义比较明确、计算精度比较高的数学模型。

考虑到降雨过程中因空气湿度处于过饱和状态而蒸发强度很小,同时为了省去测定和计算水湿树体表面积及其所吸附雨水的平均蒸发强度的麻烦,我们假定降雨过程中单位树冠投影面积内(而不是单位水湿树体表面)枝叶吸附雨水的蒸发强度为一恒定值。对于特定树种的枝叶吸附雨水特性,因其枝叶的形态特征一定,所以就仅仅是枝叶量大小和雨前林冠湿润程度的函数,而林冠的湿润程度又可以被简单地表示为距前次降雨的相隔天数的函数。

先从134组观测数据中选出38组雨量较大而能使枝叶吸附量达到最大,但又因历时相对较短即林冠截持量受降雨过程中蒸发影响较小的观测数据进行分析计算,得到树冠最大截持量和降雨特性、林冠特性之间的关系如下:

$$I_{c.m} = 2.2487e^{0.0045t_1} e^{0.1257t_2} A^{0.1786} \Delta H^{0.0751} \Delta T^{0.1510} \quad R = 0.86 \quad (2)$$

式中: $I_{c.m}$ ——林冠最大截持量 (mm)

t_1 ——降雨过程中连续降雨时数 (h)

t_2 ——降雨过程中间歇时数 (h)

A ——林冠纯郁闭度

ΔH ——冠层厚度 (m)

ΔT ——与上次降雨相隔天数 (d)

如果没有降雨过程中的间歇情况(即 $t_2 = 0$)和降雨历时 t_1 很小(即 $t_1 \approx 0$)时,这时就可以忽略枝叶表面吸附雨水的蒸发影响,则林冠最大截持量 $I_{c.m}$ 就近似为林冠最大枝叶吸附量 $I_{c.m}^*$ 。

$$I_{c.m}^* = 2.2487A^{0.1786} \Delta H^{0.0751} \Delta T^{0.1510} \quad (3)$$

这样我们便确定了林冠枝叶的最大吸附量与林冠主要特性和雨前林冠湿润程度之间的函数形式:

$$I_{c.m}^* = b_1 A^{b_2} \Delta H^{b_3} \Delta T^{b_4} \quad (4)$$

我们称在降落过程中受到林冠拦截的降雨为捕捉再量,它所占降雨比例在数值上应等于林冠纯郁闭度 A 。可以理解,没有受到林冠拦截的直接穿透雨是不可能被枝叶吸附的,只有捕捉雨量才有可能被林冠枝叶所吸附。在吸附现象的同时还存在着解吸现象。枝叶吸附量是枝叶瞬时吸附率对降雨量的积分值,因此要想深入了解枝叶吸附量的变化就必须从瞬时吸附率开始着手。那么,在没有降雨过程中降雨间歇影响时和假定把降雨过程中单位树冠投影面积内枝叶吸附雨水的平均蒸发强度视为一恒定值而不大影响枝叶瞬时吸附率的变化趋势时,林冠枝叶瞬时吸附率是怎样随雨量的增加而逐渐达到最小的呢?我们对6场降雨历时和降雨量大小不一的降雨观测所得到的9组林冠截持数据进行瞬时截持率 dI_c/dp_a 与捕捉雨量 p_a 计算(表1)。表1中的阶段降雨量为某一次观测所在时段内的降雨量,相应的累计降雨量为从本场降雨开始到本次观测时的降雨量,捕捉雨量为降雨量和纯郁闭度的乘积。同时也计算出了和降雨量相对应的瞬时干流率 ds_t/dp 数据,并分别绘图于图1和图2之中。

由图1中可以看出,瞬时截持率和捕捉雨量的关系为指数函数关系:

$$dI_c/dp_a = ae^{b \cdot p_a} \quad b < 0 \quad (5)$$

这说明林冠瞬时截持率的最大值发生在降雨开始时,当降雨刚开始时有一个林冠截持量与捕捉雨量相等的时刻,以后随捕捉雨量的增加因林冠枝叶逐渐变湿而使林冠瞬时截持率急剧下降,随后又缓慢下降并逐渐趋于一定值。从理论上讲,在捕捉雨量趋于零时瞬时截持率

表 1 林冠瞬时截持率、瞬时干流率的变化

Table 1 Changes of the instantaneous rates of crown interception and stemflow

累计降雨量 p (毫米)	3.149	12.220	30.600	51.785	1.050	1.500	0.690	1.650	0.840
阶段降雨量 dp (毫米)	6.297	11.845	24.916	17.454	2.100	3.000	1.380	3.300	1.680
纯郁闭度 A (毫米)	0.88	0.88	0.88	0.88	0.89	0.88	0.84	0.80	0.80
阶段捕捉雨量 dp_a	5.541	10.424	21.926	15.360	1.869	2.640	1.159	2.640	1.344
累计捕捉雨量 p_a (毫米)	2.771	10.753	26.928	45.571	0.935	1.320	0.580	1.320	0.672
阶段截持量 dI_c (毫米)	0.588	1.062	1.833	1.239	0.448	0.482	0.152	0.786	0.220
瞬时截持率 dI_c/dp_a	0.106	0.102	0.084	0.081	0.240	0.183	0.131	0.298	0.164
阶段干流量 ds_f (毫米)	0.195	0.623	1.493	1.140	0.016	0.044	0.020	0.047	0.036
瞬时干流率 ds_f/dp	0.031	0.053	0.060	0.065	0.008	0.015	0.014	0.014	0.021

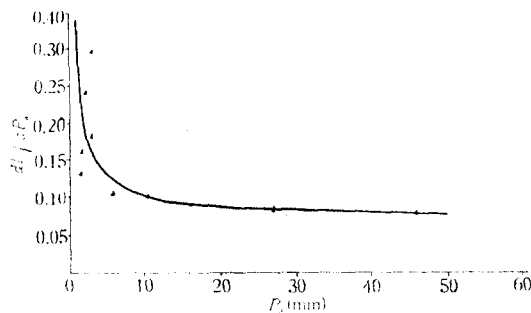


图 1 瞬时截持率和累计捕捉雨量的关系

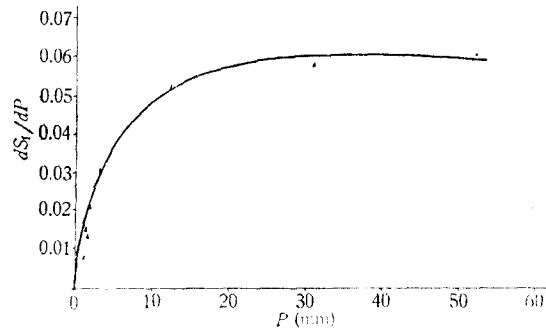
Fig.1 The relation between instantaneous rate of interception(dI_c/dp_a) and caught rainfall(P_a)

图 2 瞬时干流率和累计降雨量的关系

Fig.2 The relation between instantaneous rate of stemflow(ds_f/dp) and accumulated rainfall(P)

应趋于 1；而在捕捉雨量趋于无穷大时因林冠枝叶吸附降雨能力已经饱和，则瞬时截持率应趋于 0。在这里由图上看不是趋于 0 而是趋于一个大于 0 的常数，这是因为降雨过程中雨水蒸发影响所致。当不考虑降雨过程中蒸发影响时，有 $I_c = I_c^*$ 的关系，则

$$dI_c^*/dp_a = ae^{b \cdot p_a}, \quad b < 0 \quad (6)$$

由于在降雨刚开始时捕捉雨量近于零而瞬时截持率近于 1，即 $p_a = 0$ 时 $dI_c^*/dp_a = 1$ ，代入上式得：

$$a = 1 \quad (7)$$

$$\text{则：} \quad dI_c^*/dp_a = e^{b \cdot p_a} \quad (8)$$

对式 (8) 进行不定积分，得：

$$I_c^* = (1/b)e^{b \cdot p_a} + c \quad (9)$$

因 $p_a = 0$ 时 $I_c^* = 0$ ， $e^{b \cdot p_a} = 1$ 得：

$$c = -1/b \quad (10)$$

$$\text{则} \quad I_c^* = 1/b(e^{b \cdot p_a} - 1) \quad (11)$$

由 $p_a = \infty$ 时， $e^{b \cdot p_a} = 0$ ， $I_c^* = I_{c_m}^*$ 代入上式得

$$I_{c_m}^* = -(1/b) \quad \text{即} \quad b = -1/I_{c_m}^* \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (11) 中得：

$$I_c^* = I_{cm}^* (1 - \exp(-\frac{p_a}{I_{cm}^*})) \quad (13)$$

因为 $p_a = P \cdot A$, 所以:

$$I_c^* = I_{cm}^* (1 - \exp(-\frac{pA}{I_{cm}^*})) \quad (14)$$

设林冠投影面积内枝叶表面吸附雨水的蒸发强度为常数 b_5 , 在考虑降雨历时 T 过程中的附加截留量 $b_5 T$ 时, 则一场降雨过程中单株林木的树冠投影面积内平均截持量为:

$$I_c = I_c^* + b_5 T \quad (15)$$

对各场降雨中各株观测树木的枝叶吸附量 I_c^* , 我们可以利用式 (3) 和式 (14) 联合求出, 但由于建立式 (3) 的数据量太小, 我们没有把式 (3) 直接代入式 (15), 而是采用了其修正形式, 通过回归分析建立了林冠截持量公式:

$$I_c = (0.8240 I_c^* - 0.4807) + 0.0521 T \quad (16)$$

$$R = 0.74$$

上式中增加的修正系数和修正常数表明, 由式 (3) 和式 (14) 计算的枝叶吸附量比一般实测值稍大而需略加修正; 但另一方面也看出, 修正系数近于 1 而修正常数也很小 (仅为 0.48), 这说明式 (16) 还是能较好地反映出林冠截持在降雨过程中的变化和基本符合林冠截持的基本理论的。因此在计算一场降雨的截持总量而不是着意刻画截持量在降雨过程中的细微变化时还是可以应用的。

为了克服式 (16) 的不足, 我们又在式 (3) 和式 (14)、(15) 的基础上, 逐个逐步变动各参数值 (b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5), 以林冠截持量的预报值和观测值的离差平方和达最小为目标函数进行非线性回归分析, 所得最佳计算结果为:

$$\begin{cases} I_{cm}^* = 1.48 A^{0.13} \Delta H^{0.13} \Delta T^{0.09} \\ I_c = I_{cm}^* (1 - \exp(-\frac{pA}{I_{cm}^*})) + 0.051 T \end{cases} \quad (17)$$

$$R = 0.73$$

其中令人惊奇的是, 上式中的纯郁闭度 A 和冠层厚 ΔH 的指数竟然是相同的, 二者合并为 $(A \cdot \Delta H)^{0.13}$ 一项时正好就是一个反映林冠枝叶量多少的复合指标, 这也从一个侧面说明, 虽然 I_{cm}^* 计算公式来自于实际观测资料, 带有浓重的经验色彩而不能不分地区和树种而随意套用, 但它也还是有一定的理论基础和可用于进行一些林冠截持现象的物理解释的。

有了上述林冠截持量的计算公式, 则林冠截持率的计算公式不难求出:

$$\frac{I_c}{p} = \frac{1}{p} I_{cm}^* (1 - \exp(-\frac{pA}{I_{cm}^*})) + 0.051 \frac{T}{p} \quad (18)$$

从上式我们可以非常明显地看出林冠截持率与降雨特性和林冠特性的关系, 尤其是在降雨量 p 比较大时, 上式可以被近似表示为式 (19) 时:

$$I_c/p = 0.051 I^{-1} + I_{cm}^* p^{-1} \quad (19)$$

式中: I ——平均降雨强度 (毫米/小时)

干流现象相对于林冠截持而言是简单的, 降落在树木枝干上的降雨, 一部分用于树皮的湿润, 一部分在向下的运动中滴落, 剩余部分则转化为干流沿树干流到地面。对于某一具体

树种, 其枝干的繁茂程度和分枝角度及树皮性状等特性一定, 故其拦截降雨的多少和转化为干流的能力大小也就一定, 随着降雨量的逐渐增大必然会有一个瞬时干流率的由 0 逐渐增大并随树皮的吸水能力逐渐达到饱和而最后基本稳定的过程, 这个趋势也可从表 1 和图 2 中看出。根据图 2 所示的瞬时干流率和降雨量关系可知, 二者之间的函数关系可被近似表示为:

$$ds_f/dp = ap^b \quad 0 < b < 1 \quad (20)$$

则有:

$$S_f = \frac{a}{b+1} p^{b+1} + c$$

由 $p=0$ 时 $S_f=0$ 得 $c=0$

这样, 我们就确定了干流量和降雨量之间的关系形式:

$$s_f = \frac{a}{b+1} p^{b+1} \quad (21)$$

经对每株观测树木的每场降雨观测资料进行分析表明, 当把干流量表示为树冠投影面积内平均干流深度时, 参数 a 、 b 与树木特性及降雨特征之间并无明显关系。因此, 按上式的形式将 134 组观测数据进行回归计算, 得到刺槐干流量公式:

$$S_f = 0.027 p^{1.185} \quad R = 0.93 \quad (22)$$

四、关于研究结果应用的建议

上述刺槐单株林木的林冠截持量和干流量模型, 并不仅仅局限用于评价单株林木的功能, 而且也还可以用于推求片林、集水区乃至小流域范围内的刺槐林的相应数值。以往在调查具有不同结构的林分所具有的不同林冠截持和干流功能时, 往往需要布置大量的观测设备于不同特征的林下进行长期观测, 这不但需要花费大量的人力、物力和时间, 而且也不可能把所有的结构类型都观测到。与此相比, 采用我们建议的方法时, 就可以在很短时间内以很低的代价取得不同结构特征的林分所具有的林冠截持和干流功能大小数值。具体步骤是要先对调查范围内的林分进行调查, 求取其平均标准木所具有的与林冠截持量和干流量计算有关的结构特征, 由于单株林木的林冠截持量和干流量均是以单株林木树冠投影面积范围内的平均深度来表示的, 所以还需求取调查区域内的林冠覆盖指数, 它是反映调查区域内林冠重迭程度的一个参数, 其数值等于调查区域内所有单株林木的树冠投影面积之和与调查区域水平面积的比值。然后才可以用单株林木的林冠截持和干流规律推出调查区域内各场降雨中的相应平均值。在有计算机计算条件时, 也可把调查区域内的每株树木调查资料输入计算机利用单株林木的林冠截持和干流规律进行相应模拟而计算出调查区域内的相应数值。

另外一方面, 即使是以成片林或小流域 (而不是单株林木) 为对象进行林冠截持和干流规律研究时, 也不妨采用本研究所用的模型形式。

五、结 论

1. 单株林木的林冠截持量 (深度) 是由枝叶吸附量和附加截留量两部分组成的。林冠截持量的大小主要取决于林冠特性和降雨特性两个方面, 基于林冠截持降雨的机制, 通过进

行一些假设简化和对实测数据进行分析，建立了刺槐单株林木的林冠截持量模型：

$$\begin{cases} I_c = I_{cm}^* (1 - \exp(-\frac{pA}{I_{cm}^*})) + 0.051T \\ I_{cm}^* = 1.48(\Delta H \cdot A)^{0.13} \Delta T^{0.09} \end{cases}$$

2. 对一具体树种，单株林木的干流量（深度）大小，主要取决于降雨量大小。刺槐单株林木的干流量和降雨量之间的关系可表示为：

$$S_f = 0.027p^{1.185}$$

3. 可试用本研究所得出的单株刺槐林冠截持量和干流量模型推算成片刺槐林的相应数值，还可在建立成片刺槐林（或其他树种）的林冠截持量和干流量模型时作为参考。

4. 由于本研究结果并非完全建立在研究现象的物理机制基础之上（其中尤其是林冠最大枝叶吸附量的计算）和研究范围的局限，所以本结果仅适用于气候条件相同或相近的地区。

参 考 文 献

- 梁建民、毛士英等 1980 林冠截持降雨的观测试验研究。地理集刊（第12号）——水文分析与实验，第39—52页，科学出版社。
崔启武、边履刚等 1980 林冠对降雨的截持作用。林业科学 16(2): 141—146。
中野秀章（李云森译） 1976 森林水文学。第58—78页。中国林业出版社。

THE INTERCEPTION TO RAINFALL BY LOCUST

Wang Yanhui

(The Institute of Forestry, The Chinese Academy of Forestry)

Based on the physical mechanics of stemflow and interception by crown, and by making some suppositions to simplify, it gived out the models of stemflow and crown interception for a single locust. And simple suggestions about their applications were also discussed.