

植物叶片截留特征分析

刘艳丽¹, 王全九^{1,2}, 杨婷¹, 吕金榜¹, 徐迪¹, 石彬彬¹, 张鹏宇¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710000;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:植物最大截留量是分析植物截留量的重要参数,分别采用浸泡法和喷水法测定了 13 种植物叶片的最大截留量。结果表明:(1) 不同植物叶片最大截留量相差较大,喷水法测定的植物叶片最大截留量从腊梅叶片的 0.008 g/cm²到小叶杨叶片的 0.03 g/cm²,差异性显著($p < 0.05$),因此精确分析植物截留量时应考虑物种差异。(2) 叶长、叶宽、叶周长、叶鲜重与叶片最大截留量的相关性不显著,而叶面积与叶片最大截留量遵循线性函数变化。(3) 对于刺槐、杏树、石楠、柿子、柳树、小叶杨、石榴、白榆树、竹子、马铃薯、腊梅叶片而言,喷水法测得叶片最大截留量大于浸泡法,对于毛豆、樱桃而言,浸泡法测量的最大截留量值大于喷水法测量值。

关键词:叶片; 最大截留量; 喷水法; 浸泡法

中图分类号:S715

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)04-0143-05

Analysis of Characteristics of Plant Leaf Interception

LIU Yanli¹, WANG Quanjiu^{1,2}, YANG Ting¹, LÜ Jinbang¹, XU Di¹, SHI Binbin¹, ZHANG Pengyu¹

(1. Water Conservancy and Hydropower College, State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Losses Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Plant maximum water storage amount of interception is the significant parameter of plant interception analysis. We have determined interception capacity of thirteen kinds of plant leaves using submerging method and the spraying method. The main results showed that: (1) the maximum water storage amount of leaf is obviously different between different species, the maximum water storage amount of leave measured by spraying method changes from 0.006 g/cm² of *Chimonanthus praecox* leaf to 0.030 2 g/cm² of simon poplar leaf, significant differences ($p < 0.05$), so species differences should be considered when analyzing plant interception accurately; (2) leaf length, leaf width, leaf perimeter and leaf fresh weight had no significant correlation with the maximum water storage amount of leaf, and the maximum water storage amount of leaf changes in line with leaf area; (3) for black locus, apricot, photinia, persimmon, willow, simon poplar, white elm, pomegranate, bamboo, potato, *Chimonanthus praecox* leaves, the measured values by spraying method are higher than by submerging method, for the young soybean, cherry, the measured values by spraying method are lower than by submerging method.

Keywords: leaf; maximum water storage amount; spraying method; submerging method

林冠截留是一个重要的水文过程,在土壤—植物—大气连续体的水循环中是一个不可忽略的环节,在数量、空间及时间上重新分配降水、改变降雨动能,增加了雨水下落所需要的时间,也使部分降水变成了水蒸汽,增加了林冠层的大气湿度,引起一系列的生态效应^[1],在森林地区,整个雨季植被平均截留率高达 40%,因此林冠截留历来都是森林水文学研究的重要内容之一^[2-4]。为了分析预测植物截留量,人

们建立了不同类型的模型,这些模型主要依据 Horton^[5]提出的截留机制,即截留量可分解为“枝叶吸附容量”和树体表面蒸发导致的“附加截留量”。Merriam^[6]认为截留量与降雨量之间呈指数递减规律,提出了植物截留模型,模型中枝叶吸附量与降水量之间呈指数关系。Aston^[7]在实验室内用降水模拟法对 8 株小树进行了截留试验,引入自由透流系数的概念提出截留模型。王彦辉^[8]考虑了吸附容量与树冠特征

的关系,把湿润树体的蒸发强度简化为常数(e),引入林冠纯郁闭度(A),建立截留模型。崔启武等^[9]认为,截留量随着降雨量的增加而增加,但其增加的幅度有限,最终趋于一个定值,这就是林冠的实际最大截留量,亦即林冠对一次降雨的实际最大截留量。崔启武模型和王彦辉模型^[10]已在较多关于冠层截留的模拟研究中运用,两模型均可作为通用模型,也适用于黄土地区^[11-12]。其中林冠最大截留量是所有冠层截留模型的重要参数^[13],为了便于应用,大多数植物截留模型中都直接引用了林冠最大截留量这个参数,而没有考虑物种差异。

同时 Keim 等^[14]认为,植物鲜重不能很好反映不同物种截留特性差异,可以将植物的非叶生物量换算成叶面积,然后根据植物叶片单位面积截留量推求冠层截留量。为了分析不同植物叶片截留特征,本文选取黄土区内 13 种植物,分别采用浸泡法和喷水法测定不同植物叶片的最大截留量,探讨两种测定方法造成植物叶片最大截留量差异的可能原因,为分析植物截留特征提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

为了研究不同植物叶片的最大截留量,根据黄土区气候条件和植物分布类型,在 7 月份选择 2 种作物和 11 种植物作为供试对象。作物包括毛豆、马铃薯,植物包括杏树、小叶杨、白榆树、刺槐、柳树、柿子树、樱桃树、竹子、石楠、腊梅、石榴树。不同生活型,不同叶片质地,叶面有无绒毛对叶片截留能力都有很大影响,为了对比分析其对叶片截留造成的差异性,研究对象分别涉及乔木、灌木、草本三种生活型,落叶和常绿两种叶习性及多种科类植物。这几种植物均是黄土区广泛分布的常见物种,且其叶面特征各具代表性,形状和长势各有特点,叶片质地与绒毛疏密程度各不相同。供试植物生活习性及叶面特征见表 1。

1.2 试验方法

为了测定不同植物叶片截留能力的差异性,在晴天时,选择大小不同的健康叶片,从树冠的内外上下多点采样。根据叶片大小选择试验叶片数量,叶片较大的选择 15~20 片,较小的选择 35~45 片,每个物种各设 3 个重复。将采集的叶片轻轻放入自封袋内,封存后带回实验室用于测定。通过平台扫描仪获取叶片标准图形,并使用 Matlab 进行图像处理计算叶面积。人们室内测定植物截留量通常采用两种方法——浸泡法和喷水法,研究得出喷水法测定的植物截留量大于浸泡法测量值^[15]。为了探讨两种方法造

成叶片截留量的差异性,本文分别选取浸泡法和喷水法测定不同叶片最大截留量,在实验室无风条件下,将新鲜叶片用 0.001 g 分析天平称重,用镊子夹住将其浸在水中 30 min^[16]或使用喷壶向叶片表面喷水至水沿叶片流下^[14-15],在喷水法中,每次将喷嘴旋钮调节到一定位置,保证喷水水滴下降连续成线,接近中雨状态。取出控水 1 min,待叶片不滴水时重新称重,吸附水量为叶片浸泡后的重量与浸泡前重量的差值,将测定后的叶片晾干,通过平台扫描仪获取叶片标准图形,并测定叶长、叶宽及叶周长。

表 1 供试植物生活习性及叶面特征

物种	科	生活型	叶习性	叶片特征
小叶杨	杨柳科	乔木	落叶	边缘平整,细锯齿,无毛
马铃薯	茄科	草本	落叶	两面均均有疏柔毛
石榴	石榴科	灌木	落叶	表面有光泽
樱桃	蔷薇科	乔木	落叶	缘有锯齿,上面无毛或微有毛,背面疏生柔毛
杏树	蔷薇科	乔木	落叶	叶边有锯齿,两面无毛或下面脉腋间具柔毛
柳树	杨柳科	乔木	落叶	边缘具有小锯齿,两面均平滑无毛
白榆树	榆科	乔木	落叶	叶缘不规则重锯齿或单齿,无毛
石楠	蔷薇科	灌木	常绿	无毛、革质,边缘有锯齿
柿子	柿树科	乔木	落叶	叶上面有光泽,无毛,下面有柔毛或无毛
刺槐	豆科	乔木	落叶	质薄,有光泽
毛豆	豆科	草本	落叶	两面散生糙毛
竹子	禾本科	草本	常绿	边缘一侧较平滑,另一侧具小锯齿,无毛,质薄
腊梅	腊梅科	灌木	落叶	无毛

具体计算公式如下:

$$I=M_1-M_0$$

(1)

$$I_{cm}=(M_1-M_0)/S$$

(2)

式中: I ——最大截留量(g); I_{cm} ——单位叶面积的最大截留量(g/cm²); M_1 ——样本鲜重(g); M_0 ——样本浸水或喷水后重(g); S ——叶面积(cm²)。

2 结果与分析

2.1 植物叶片截留量对比分析

为研究不同植物叶面特征对截留能力的影响,采用更接近于实际降雨形态的喷水法来测定不同植物单位叶面积最大截留量,实测结果见图 1。由图 1 可以看出,小叶杨、马铃薯、石榴、樱桃、杏树、柳树、白榆树、石楠、柿子、刺槐、毛豆、竹子、腊梅叶片的最大截留量依次减小。结果也显示,不同物种叶片截留能力相差较大,植物叶片最大截留量从腊梅叶片的 0.008

g/cm² 到小叶杨叶片的 0.03 g/cm², 有显著差异 ($p<0.05$)。进一步分析看出, 相对于灌木和草本, 乔木的平均叶片截留能力较高; 相对于常绿植物, 落叶植物的叶片平均截留能力较高。乔木叶片中截留能力最强为小叶杨, 灌木叶片中截留能力最强为石榴, 草本叶片中截留能力最强为马铃薯。对于植物叶面而言, 表面有大量的表皮细胞、附生的绒毛和蜡质晶体等微观几何结构形成的非光滑体^[17]。Hall 和 Burke^[18] 研究发现接触角越大越不利于叶片持水, 而接触角 $>90^{\circ}$ 为不润湿叶片, 叶面几乎没有水滴。王会霞^[19] 研究发现蜡质具有疏水性, 但是当叶片表面蜡质层厚度减小时, 水与叶面之间的粘性剪切力增大, 从而使得液滴更易在叶片表面铺展。对于刺槐和小叶杨叶片, 二者表面均无绒毛, 刺槐叶片接触角为 130.1° , 蜡质含量为 0.59 g/m^2 ; 小叶杨为 80.8° , 蜡质含量为 0.39 g/m^2 ^[19], 试验测得小叶杨叶片最大截留量远大于刺槐叶片。Brewer 等^[20] 研究发现适量稀疏绒毛有利于刺破水滴表面诱导水滴分散成膜, 但密被绒毛反而不利于叶片持水。对于 13 种植物叶片而言, 除毛豆、石榴、小叶杨外, 叶片最大截留量均随着叶面绒毛增加而增加, 说明适量的绒毛有利于持水。其中表面密被绒毛的毛豆叶片最大截留量较低, 说明密被绒毛反而不利于叶片持水, 叶面光滑、适量蜡质的小叶杨和石榴叶片最大截留量较高, 说明叶面适宜蜡质层厚度反而利于液滴铺展。可以看出叶面特征对于叶片截留是一个很复杂的影响因素, 不同植物叶片表面特征有很大差异, 接触角、绒毛覆盖程度以及蜡质层厚度各不相同, 导致叶面吸水能力及其表面承受的水珠能力也完全不同。而试验结果表明对于不同植物叶片而言, 蜡质层厚度及绒毛数量与叶片最大截留量并不是线性关系, 二者对叶片最大截留量的影响均存在临界值, 还需要进一步研究。

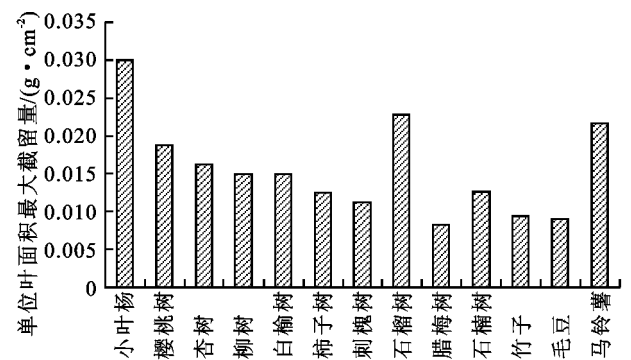


图 1 不同植物叶片单位叶面积最大截留量

2.2 浸泡法与喷水法测定叶片截留能力的对比分析

为了探讨浸泡法和喷水法造成植物叶片截留量的差异性, 分别采用这两种方法测定叶片最大截留

量。试验分析表明不同植物叶片的叶长、叶宽、叶周长、叶鲜重与叶片最大截留量相关性均不显著, 而叶面积与叶片最大截留量呈很好的线性相关关系, 刘战东等^[21] 研究也发现冬小麦冠层最大截留量与叶面积指数呈正相关关系。图 2 显示了两种方法测定的叶面积与叶片最大截留量的关系。从图中可以看出, 对于刺槐、杏树、石楠、柿子、柳树、小叶杨、石榴、白榆树、竹子、马铃薯、腊梅而言, 喷水法测得的最大截留量大于浸泡法测量值, 这与喷水时在叶面形成大量的水滴有关。Beysens 等^[22] 认为向叶面喷水时易于在叶表面形成水珠。Calder 等^[23] 研究了液滴体积对植物冠层截留的影响, 发现喷水时小的液滴体积对叶面的润湿效果更好。浸泡法中叶片抽出水面时, 可能会由于容器内自由水的表面张力作用与叶面上部分被吸持的水发生相互作用而脱离叶面, 从而导致叶面持水量较低。当向叶面喷水时, 首先形成的是能够吸持在叶面的小液滴, 叶面上有大量的凝聚中心, 因此导致喷水法测得的最大截留量大于浸泡法测量值。但是对于毛豆、樱桃而言, 浸泡法测量的最大截留量大于喷水法测量值, 且随着叶面积增大, 两种测量值的差距愈加明显, 这是因为如果小液滴尺寸大于非光滑体(表面有大量的表皮细胞、附生的绒毛和蜡质晶体等微观几何结构形成的非光滑体), 疏水表面上的液滴不能填满粗糙表面的凹槽, 在液滴下部存在空气, 导致液滴与固体表面的接触面积较小^[24], 液滴与固体表面的作用力较低, 较低容易脱落, 导致喷水法测量的叶片最大截留量较低。另一方面, 浸泡法使叶片完全浸入水中, 且时间较长, 更利于样本充分吸收水分, 说明毛豆和樱桃叶片相对于其余叶片更容易吸收水分, 其吸收的水量高于表面附着的水分, 导致浸泡法测量值明显高于喷水法。同时试验中还发现, 水分在不同叶面上的存在状态不同, 对于绒毛覆盖的叶片表面水分呈水滴状, 而光滑的叶片表面水分铺展成薄的水膜状。研究发现液滴在不同叶面上的存在状态不同, 液滴与叶片表面之间的相互作用与液滴特性(液滴直径、液滴能量等)、表面特性(干燥、湿润、蜡质、绒毛等)以及叶片的不同倾角等密切相关^[25]。因此, 液滴在不同叶面上的形成是一个复杂的过程, 有待于进一步深入研究。

根据曲线变化趋势, 采用线性函数对叶片最大截留量与叶面积的关系进行拟合, 即:

$$I_{cm} = \alpha S \tag{3}$$

式中: I_{cm} ——植物叶片最大截留量(g); α ——拟合系数, 反映了单位叶面积的最大截留量(g/cm^2); S ——叶面积(cm^2)。

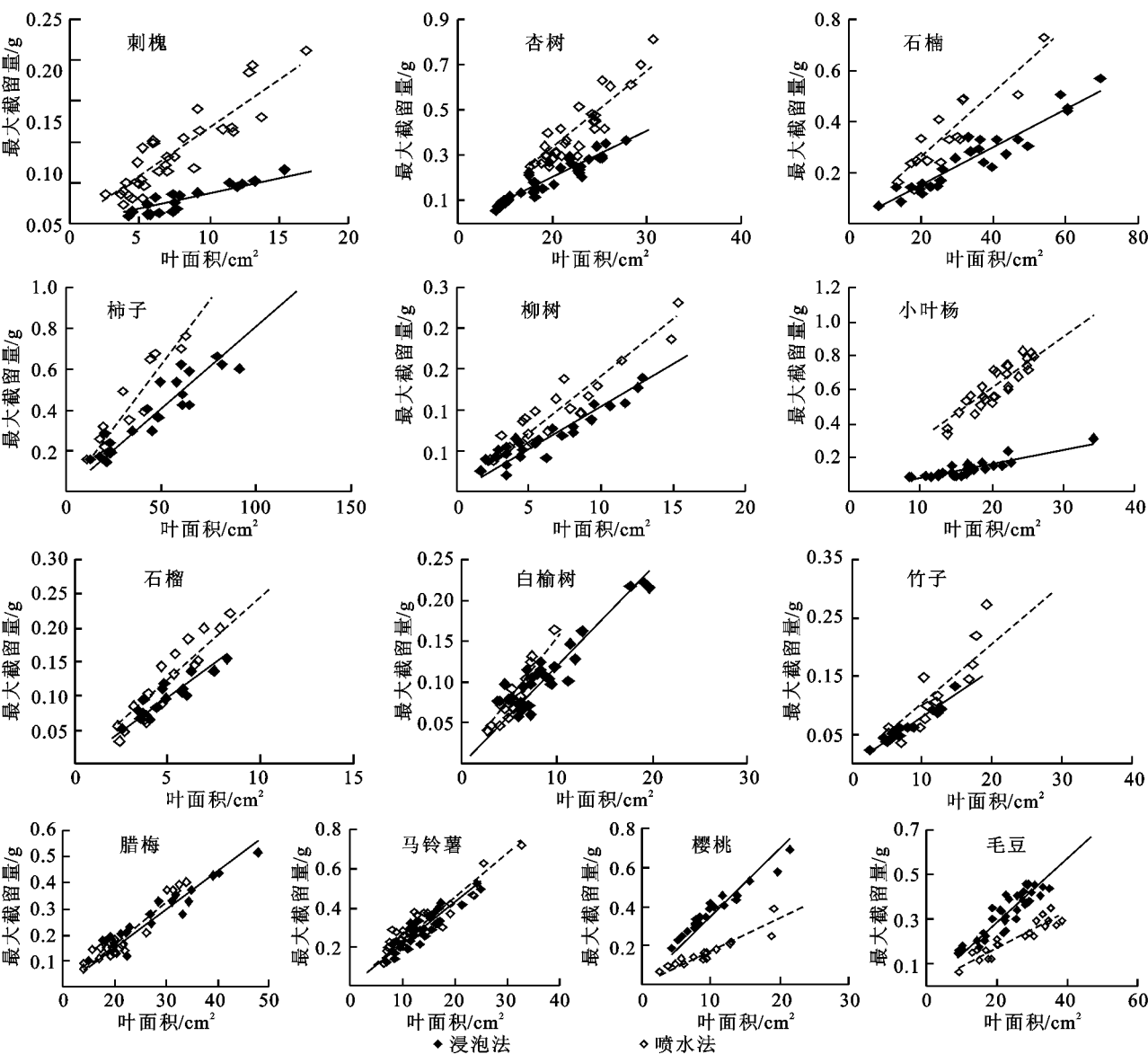


图 2 不同植物叶片最大截留量随叶面积变化曲线

表 2 列出了线性拟合参数值。结果表明,决定系数 R^2 较高,为 0.804 3~0.918 3,均通过 F 检验,达到 0.01 极显著性水平($p<0.01$)。表明不同植物叶片的最大截留量和叶面积之间的关系满足很好的线性正相关关系。不同物种叶片 a 值相差较大,喷水法 a 值从腊梅叶片的 0.006 g/cm² 到小叶杨叶片的 0.030 2 g/cm²。浸泡法 a 值从刺槐叶片的 0.003 7 g/cm² 到樱桃叶片的 0.035 1 g/cm²。

已有研究表明,浸泡法不能反映真实的冠层降雨截留特性^[26],它低估了最大截留量,其中未考虑凝结液滴的形成是导致其较低的原因之一^{—[27]},而且叶片提出水面时,自由水面的表面张力对叶片吸附的水滴会产生影响,而喷水法以水滴形式接触叶面,更接近于雨滴形态。因此本文对两种方法截留量测定值进行分析,发现二者满足很好的线性关系:

$$I_{\text{喷}}=\beta I_{\text{浸}}\tag{4}$$

式中: $I_{\text{喷}}$ ——喷水法测定的单位叶面积最大截留量(g/cm²); β ——系数; $I_{\text{浸}}$ ——浸泡法测定的单位叶面积最大截留量(g/cm²)。

表 2 不同植物叶片最大截留量随叶面积变化过程的拟合结果

物种	参数 a 拟合值		R^2	
	喷水法	浸泡法	喷水法	浸泡法
小叶杨	0.0302	0.008	0.8043	0.8206
石榴树	0.0246	0.0195	0.8445	0.808
马铃薯	0.0226	0.0214	0.8156	0.8172
樱桃树	0.0169	0.0351	0.8485	0.8299
杏 树	0.0166	0.0102	0.8093	0.8549
白榆树	0.0152	0.012	0.8467	0.8322
柳 树	0.014	0.0104	0.8743	0.8347
石榴树	0.0126	0.0075	0.8133	0.9
柿子树	0.0123	0.0081	0.8633	0.8262
刺槐树	0.0116	0.0037	0.8092	0.8043
竹 子	0.0102	0.008	0.852	0.871
毛 豆	0.0084	0.0142	0.8398	0.8186
腊梅树	0.006	0.008	0.9022	0.9183

表 3 列出了拟合关系式。结果表明,决定系数 R^2 较高,为 0.762 9~0.929,均通过 F 检验,达到 0.01 极显著性水平 ($p<0.01$)。对于刺槐、小叶杨、石楠、杏树、柿子树、石榴树、柳树、马铃薯、竹子、白榆、腊梅而言,系数 β 值均大于 1 且依次减小,逐渐接近 1,即喷水法测定的单位叶面积最大截留量值均大于浸泡法测定值,且采用两种方法的测定结果愈加接近。对于毛豆和樱桃而言,系数 β 值均小于 1,即喷水法测定的单位叶面积最大截留量值均小于浸泡法测定值。因此在测定叶片最大截留量时,可以采用方便简单的浸泡进行测定,再根据二者之间的关系式将之化为更接近于实际降雨状态的喷水法测定值。

表 3 浸泡法与喷水法测定单位叶面积最大截留量关系拟合结果

物种	拟合公式	R^2
刺槐树	$I_{\text{喷}}=3.6646I_{\text{浸}}$	0.9047
小叶杨	$I_{\text{喷}}=3.6497I_{\text{浸}}$	0.8171
石楠树	$I_{\text{喷}}=1.7570I_{\text{浸}}$	0.7629
杏 树	$I_{\text{喷}}=1.5198I_{\text{浸}}$	0.8869
柿子树	$I_{\text{喷}}=1.2781I_{\text{浸}}$	0.8542
石榴树	$I_{\text{喷}}=1.2289I_{\text{浸}}$	0.8593
柳 树	$I_{\text{喷}}=1.1579I_{\text{浸}}$	0.8891
马铃薯	$I_{\text{喷}}=1.1381I_{\text{浸}}$	0.8965
竹 子	$I_{\text{喷}}=1.1163I_{\text{浸}}$	0.7629
白榆树	$I_{\text{喷}}=1.0304I_{\text{浸}}$	0.8031
腊梅树	$I_{\text{喷}}=1.0134I_{\text{浸}}$	0.9031
毛 豆	$I_{\text{喷}}=0.5883I_{\text{浸}}$	0.929
樱桃树	$I_{\text{喷}}=0.4788I_{\text{浸}}$	0.8673

3 结 论

(1) 不同物种叶片截留能力相差较大,喷水法测定的植物叶片最大截留量从小叶杨叶片的 0.03 g/cm² 到腊梅叶片的 0.008 g/cm²,差异性显著 ($p<0.05$),由于不同植物叶片表面特征有很大差异,在精确分析植物降雨截留量时应考虑物种差异。

(2) 植物叶片的叶长、叶宽、叶周长、叶鲜重与叶片最大截留量相关性不显著,而叶面积与叶片最大截留量呈很好的线性正相关关系。不同植物叶片最大截留量随叶面积增加的速率有很大差异,且在同一叶面积下的截留量也完全不同,说明不同植物叶片的截留能力有很大差异性。

(3) 对于刺槐、杏树、石楠、柿子、柳树、小叶杨、石榴、白榆树、竹子、马铃薯、腊梅叶片而言,喷水法测得的叶片最大截留量显著大于浸泡法测量值,对于毛豆、樱桃而言,浸泡法测量的最大截留量大于喷水法测量值,且随着叶面积增大,两种方法测量值的差距愈加明显。

参考文献:

[1] 梁文俊,丁国栋,臧荫桐,等. 华北土石山区油松林对降雨再分配的影响[J]. 水土保持研究,2012,19(4):77-80.

[2] 周国逸. 几种常用造林树种冠层对降水动能分配及川生态效应分析[J]. 植物生态学报,1997,21(3):250-259.

[3] 张焜,张洪江,程金花,等. 重庆四面山三种人工林林冠截留效应研究[J]. 水土保持研究,2011,18(1):201-204.

[4] 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.

[5] Horton R E. Rainfall interception[J]. Monthly Weather Review,1919,47(9):603-623.

[6] Robert A. Merriam. A note on the interception loss equation[J]. Journal of geophysical research,1960,65(11):3850-3851.

[7] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees [J]. Journal of Hydrology,1979,42(3):383-396.

[8] 王彦辉. 陇东黄土地区刺槐林水土保持效益的定量研究[J]. 北京林业大学学报,1986,8(1):35-52.

[9] 崔启武,边履刚,史继德,等. 林冠对降水的截留作用[J]. 林业科学,1980,16(2):141-146.

[10] 王彦辉. 刺槐对降雨的截持作用[J]. 生态学报,1987,7(1):43-49.

[11] 卫三平,王力,吴发启. 黄土丘陵沟壑区刺槐林冠截留模拟[J]. 林业科学,2008,44(1):26-33.

[12] 余冬立,刘营营,邵明安,等. 黄土坡面不同植物冠层降雨截留模型模拟效果及适用性评价[J]. 农业工程学报,2012,28(16):115-120.

[13] Muzylo A, Llorens P, Valente F, et al. A review of rainfall interception modeling [J]. Journal of Hydrology, 2009,370(1/4):191-206.

[14] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity [J]. Advances in Water Resources,2006,29(7):974-986.

[15] Georg Wohlfahrt, Karin Bianchi, Alexander Cernusca. Leaf and stem maximum water storage capacity of herbaceous plants in a mountain meadow[J]. Journal of Hydrology,2006,319(1/4):383-390.

[16] 马惠,张洪,江叶,等. 重庆市四面山不同森林类型林冠的截留作用[J]. 中国水土保持科学,2010,8(6):108-114.

[17] Wagner P, Fürstner R, Barthlott W, et al. Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces[J]. Journal of Experimental Botany,2003,54(385):1295-1303.

[18] Hall D M, Burke W. Wettability of leaves of a selection of New Zealand plants[J]. New Zealand Journal of Botany,1974,12(3):283-298.

通过精准配方施肥、秸秆还田、谷豆科作物轮作、种植绿肥作物等技术来实现用地与养地的结合。

(3) 北部生态旅游区。辉县市和卫辉市的山地丘陵区,以其优美的自然生态环境和独特的人文景观成为生态旅游区。因位于太行山腹地,区域森林覆盖率达到 90%以上,成为金钱豹、猕猴等珍稀动物的栖息地,并享有“太行氧吧”的美誉,坐落有万仙山、八里沟、关山国家地质公园、比干庙及姜太公故里等景点。万仙山、八里沟是著名的写生基地、影视基地及避暑基地,近年来,随着旅游业的发展,游客规模逐渐增大,生活垃圾成为主要污染物,制约着旅游业的可持续发展。因此,应加强生态旅游业的规划与管理,完善生态基础设施,适当增加环保垃圾桶的数量;开发低碳旅游产业,增加旅游竞争力;加大环保宣传和教育的力度,打造解说牌和宣传卡,增强人们的环保意识。

参考文献:

- [1] 周晓飞,雷国平,徐珊.城市土地利用绩效评价及障碍度诊断:以哈尔滨市为例[J].水土保持研究,2012,19(2):126-130.
 - [2] 赵宏波,马延吉.东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子:以吉林省为例[J].应用生态学报,2014,25(2):515-524.
 - [3] 郑华伟,张锐,杨兴典,等.基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价及障碍因子诊断[J].长江流域资源与环境,2012,21(9):1099-1105.
 - [4] 毛晓丹,冯中朝.湖北省农业循环经济发展水平评价及障碍因素诊断[J].农业现代化研究,2013,34(5):597-601.
 - [5] 黎孔清,陈银蓉.低碳理念下的南京市土地集约利用评价[J].中国土地科学,2013,27(1):61-66.
 - [6] 吴泽斌,刘卫东,汪友结,等.城市土地生态利用水平测度及障碍因子诊断[J].中国人口·资源与环境,2010,20(2):24-29.
 - [7] 王军,何玲,董谦,等.河北省农业生态安全障碍度评价与对策研究[J].农业现代化研究,2010,31(1):81-85.
 - [8] 黄贤金.区域循环经济发展评价[M].北京:社会科学文献出版社,2007.
 - [9] 李晓燕,王宗明,张树文.基于 GIS 的区域生态安全障碍因素分析:以吉林省西部为例[J].中国农学通报,2007(11):339-343.
 - [10] 秦钟,王建武,章家恩,等.广东省循环农业发展的综合评价及其障碍度诊断[J].生态科学,2009(3):264-271.
 - [11] 彭补拙,安旭东,陈浮,等.长江三角洲土地资源可持续利用研究[J].自然资源学报,2001(4):305-312.
 - [12] 李志军,刘继生.吉林省循环农业发展评价及优化调控研究[J].人文地理,2011(2):98-102.
 - [13] 张风丽,龚新蜀.新疆工业生态安全评价及障碍因子诊断[J].企业经济,2013(6):15-20.
 - [14] 张锐,刘友兆.我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J].长江流域资源与环境,2013,22(7):945-951.
 - [15] 胡志朋,杨凤海,周晓飞.肇源县耕地集约利用评价及障碍度诊断[J].水土保持研究,2013,20(1):148-151,155.
 - [16] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等.基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J].资源科学,2011,33(3):535-541.
 - [17] 张小虎,牛海鹏,张合兵,等.粮食主产区耕地集约利用及障碍因素诊断[J].水土保持通报,2012,32(5):87-92.
-
- (上接第 147 页)
- [19] 王会霞.基于润湿性的植物叶面截留降水和降尘的机制研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
 - [20] Brewer C A, Smith W K, Vogelmann T C. Functional interaction between leaf trichomes, leaf wettability and the optical properties of water droplets[J]. Plant, Cell & Environment, 1991, 14(9):955-962.
 - [21] 刘战东,高阳,巩文军,等.冬小麦冠层降雨截留过程及其模拟研究[J].水土保持研究,2012,19(4):53-58.
 - [22] Beysens D, Steyer A, Guenoun P, et al. How does dew form[J]. Phase Transitions, 1991, 31(1/4):219-246.
 - [23] Calder I R, Hall R L, Rosier P T W, et al. Dependence of rainfall interception on drop size; 2. Experimental determination of the wetting functions and two-layer stochastic model parameters for five tropical tree species[J]. Journal of Hydrology, 1996, 185(1/4):379-388.
 - [24] 程星.滴水石形态组合及滴率条件:以贵州洞穴为例[J].中国岩溶,1990,9(2):119-129.
 - [25] Šikalo Š, Ganić E N. Phenomena of droplet-surface interactions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006, 31(2):97-110.
 - [26] 王会霞,石辉,玉亚,等.植物叶面自由能特征和水滴形态对截留降水的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):249-252.
 - [27] Calder I R. Dependence of rainfall interception on drop size; 1. Development of the two-layer stochastic model [J]. J. Hydrol., 1986, 185:363-378.