

文章编号:1001-8166(2009)07-0825-09

基于不同郁闭度的青海云杉冠层截留特征研究^{*}

谭俊磊^{1,2}, 马明国¹, 车涛¹, 白云洁^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:祁连山区为石羊河、黑河和疏勒河等内陆河流域的主要水源涵养区域, 青海云杉作为祁连山区水源涵养林的主要建群种, 对流域尺度的水文过程起到了重要的作用。很多学者对该地区的青海云杉冠层截留特征进行了研究, 但是在进行集雨器布设的时候多采用随机或者规则采样方法, 两种方法由于没有考虑到冠层结构的影响, 所以不易具有很好的代表性。试图采用一种新的布设雨量筒的方法: 即根据雨量筒上方冠层的郁闭度来确定雨量筒的布设位置, 使其大致能够在郁闭度区间内均匀分布。同时在实验样地内还采用了规则采样方法布设了集雨槽, 用来做对比分析。为了得到冠层郁闭度, 实验采用遥感图像处理软件 ENVI 来对普通数码相机采集的冠层图像进行处理。利用数理统计原理和数学模型, 对观测期间的 34 组降雨数据进行了综合分析, 并且和规则网格采样的结果进行了对比。结果表明: 林内的穿透降雨和郁闭度之间呈现非线性关系; 平均林内穿透降雨量随降雨量的增加而增加, 二者之间呈现良好的线性关系; 在一定的降雨量范围内林冠截留量随降雨量的增加而增加, 反之, 林冠截留量减少; 青海云杉林冠层的总截留降水率为 22.2%; 根据郁闭度来确定雨量筒的布设位置是可行的。

关键词:青海云杉; 郁闭度; 穿透降雨; 林冠截留

中图分类号: S715.2; P463.22

文献标志码: A

1 引言

在降雨期间和降雨后, 植被对降雨的截留和随后的蒸发是陆地生态系统水分平衡中的重要组成部分, 对于森林生态系统来说尤为重要^[1]。在森林生态系统中, 不同冠层对降雨的截留效应响应也不同, 这导致了林内穿透降雨的分布异质性。林内穿透降雨的空间分布将影响土壤水分的空间分布, 继而影响树和林下物种的根系分布及行为^[2]。植被冠层截留的降水不仅调结了生态系统的水分分配, 而且对流域尺度水文过程也会产生一定的影响。

林冠截留降雨模型对于理解林分的降雨截持作用和估计林冠的截留量具有重要的作用^[3]。国内

外学者已建立了多种林冠截留模型^[4], 如: Rutter 等和 Gash 的林冠截留模型因物理意义明确、涵盖面广、误差小而受到广泛应用^[8~10]; 刘家冈^[4]根据林冠分配降雨规律与光线在林冠中辐射传播的相似性, 建立了林冠截留降雨的理论模型, 该模型推导合理, 是我国比较成功的理论模型。这些模型大体可分为经验统计模型、理论模型和随机模型 3 种^[12,13]。经验统计模型应用方便, 但不能反映冠层截留与各个生态因子之间的关系, 理论模型则可以从物理机理的角度来描述截留过程, 但往往计算复杂^[14]。目前研究和应用较多的仍然是经验统计模型和半经验性理论模型。

祁连山现有水源林 $4.36 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 主要有青海

^{*} 收稿日期: 2009-04-28; 修回日期: 2009-06-05.

^{*} 基金项目: 中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号: KZCX2-XB2-09-03); 国家重点基础研究发展计划项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(编号: 2007CB714401); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目“黑河上游毒草的遥感监测与空间分布规律研究”(编号: CACX0728501001)资助。

作者简介: 谭俊磊(1983-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事植被定量遥感研究工作. E-mail: tanjunlei@163.com

云杉林(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏林(*Sabina przewalskii*)和灌木林3大类型,青海云杉是水源林的主要建群种,面积占水源林总面积的24.74%,占乔木林总面积的75.72%^[15]。付辉恩^[16]、车克钧^[17]、王金叶^[15,18]和党宏忠^[19]等分别在祁连山寺大隆林区、西水林区、天祝林区对青海云杉林的水文功能进行了研究。这些研究探讨了林冠层、树干、苔藓枯枝落叶层对降水的截留分配效应,为认识森林特点特别是青海云杉林的水文作用提供了可靠的依据^[20]。但是在这些研究中,承雨槽、雨量筒多是通过随机方法或者规则格网采样来布设。在青海云杉林冠层分布异质性比较大的情况下,这两种采样方法不易具有很好的代表性,容易产生偏差。

为了避免上述两种采样方法可能带来的偏差,本文试图根据不同郁闭度下布置的雨量筒来分析青海云杉林的截留特征。同时为了做对比,在试验样地内根据规则格网采样的方法布设了9个承雨槽。结果表明通过郁闭度来确定雨量筒的分布位置是可行的。

2 实验样地概况

关滩森林站水文实验样地位于甘肃省张掖市肃南裕固族自治县,属于大野口流域。该流域是一个独立水系,大野口水库以上汇水面积为70 km²,主要树种为青海云杉林。实验样地临近的排露沟流域海拔2 600~3 800 m,年平均气温0.70℃,年平均降水量435.5 mm^[21]。样地大小为25 m×25 m,中心点经纬度坐标为:100°15′ E、38°32′ N,中心点海拔2 835 m,平均郁闭度为78.99%。样地内乔木树种均为青海云杉,共77棵,平均树高11.5 m,平均枝下高5.0 m,平均胸径16.3 cm。

3 实验方法

3.1 确定雨量筒对应的冠层郁闭度

郁闭度主要有两种定义:一种是垂直郁闭度^[22],即树冠的投影面积与林地面积之比^[23,24];另一种是点郁闭度^[22],即从林地一点向上仰视,被树木枝体所遮挡的天空球面的比例^[25],这一概念也得到了学者的认可^[26~28]。在本文中采用了第二种定义。

为了精确地确定雨量筒上方的冠层郁闭度,本文采用了照相机^[22]。Guevara-Escobar^[29]分析了不同数码相机(Kodak DC-120和Canon EOS D1)在不同参数设置情况下得到的冠层郁闭度结果,并将最

终结果与Li-Cor LAI-2000植被冠层分析仪的结果进行了比较,表明用普通数码相机来测定冠层郁闭度是可行的。

本试验采用了普通的数码照像机PENTAX K100D,传感器类型CCD,传感器尺寸23.5 mm×15.7 mm,图像分辨率设置为2 400×1 600。采集照片时,将相机固定在三脚架上,调节相机呈水平,高度为1 m,并使相机镜头中心处于雨量筒中心正上方,曝光模式设成自动,以避免过度曝光^[30]。

计算雨量筒正上方冠层郁闭度的具体步骤如下:

(1) 对每个雨量筒对应的冠层照片,在遥感图像处理软件RSI ENVI 4.3中进行非监督分类。通过多次的分类比较,最终选用K-Mean方法来进行非监督分类,共分为5类。由图1可以看出,天空的背景能够很好的和冠层区分出来,并且树枝的细节也能够表现出来。

(2) 该实验样地内共有青海云杉77棵,平均枝下高5.0 m,平均树高为11.5 m,本文假设二者的平均值8.25 m处为冠幅最大处。为了确定雨量筒在不同高度的时候,其在冠层图像上所占的像元数目,我们制作了一个20 cm直径的白色圆形纸片,固定在一个黑色背景上,用该纸片来代替雨量筒。将纸片的中心和数码相机(PENTAX K100D)的镜头中心对准,分别在距纸片5 m、6 m、7 m、8 m、9 m、10 m、11 m、11.5 m处水平拍摄,其中相机的参数设置和拍摄冠层照片的时候相同。不考虑数码相机的畸变影响,雨量筒在图像上是一个圆,我们取8 m处的图像来计算雨量筒实际上占有的半径,此时半径为15个像元。考虑到四周高大树木、风等影响因素,实际上影响雨量筒的冠层范围要大于自身的尺寸,本文假设该范围为一个圆,半径为雨量筒半径的5倍。在遥感图像处理软件ENVI中确定冠层照片的中心点,即雨量筒中心点正上方对应的位置。以图像中心点位置为圆心,取半径为75个像元的圆形感兴趣区(ROI)来代表雨量筒实际上控制的冠层范围。

(3) 在分类后的冠层照片图像上,统计圆形ROI内所有非天空像元总数、ROI包含总像元个数,前者占后者的百分比即为该处的冠层郁闭度。

3.2 雨量器的规格与布设

在实验样地临近的空地上布设了2个雨量筒(直径20 cm),用于人工观测大气降雨量。

实验样地内布设的雨量器包括两种:自制承雨槽:长100 cm、宽20 cm、高25 cm;雨量筒:直径为20 cm,和样地外空地上的雨量筒规格一样。

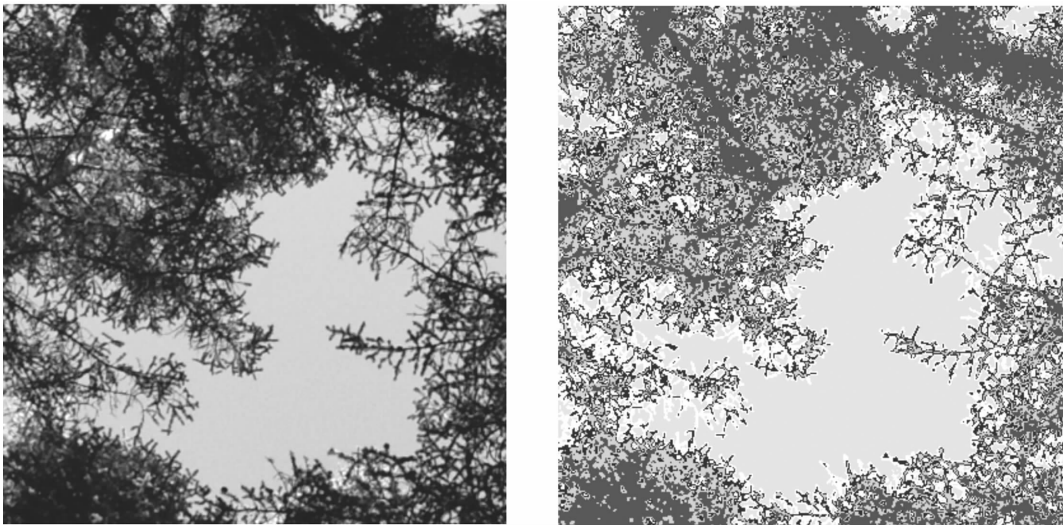


图 1 用 PENTAX K100D 拍摄的冠层照片和非监督分类后的图像
Fig.1 Canopy photo by PENTAX K100D and unsupervised classes image

承雨槽的布设原则:在样地内依 12.5 m 间隔划出正方形网格,在格点上机械布设承雨槽,共布设了 9 个。作为承雨槽观测数据的对照,我们在样地内的一个较大林窗下布设了一个同样大小的承雨槽。

雨量筒的布设原则:在样地内首先根据目视的郁闭度大小来布设雨量筒,共 32 个;然后,根据上面的方法确定每个雨量筒对应的郁闭度。根据计算的郁闭度分布情况,最终选择了 20 个雨量筒,这 20 个雨量筒的郁闭度大致在 0% ~ 100% 的郁闭度区间内均匀的分布,郁闭度分布如图 2 所示。

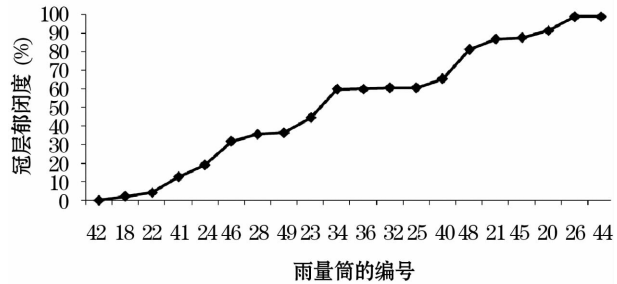


图 2 不同雨量筒及其对应的冠层郁闭度
Fig.2 Canopy closure on top of each rain gauge

3.3 资料收集、处理

在每次降雨结束后,用标准的 20 cm 直径雨量筒的专用量雨器收集雨量筒和承雨槽中的集水量。承雨槽测得的集水量通过公式转换,变换为降雨量。到达林下土地表面的一部分即林内穿透降雨,是由自由通过林冠间隙的自由穿透降雨和林冠截留降雨

后形成的滴落流组成。一部分被冠层截留的雨滴沿着树枝和树干到达地表的称为树干茎流。降雨中没有到达地表的那一部分被称为降雨截留,它由林分和降雨的特征决定^[31]。本实验采用的计算降雨截留的公式为:降雨截留量 = 大气降雨 - 林内穿透降雨 - 树干茎流^[32]。常学向^[32]在对祁连山寺大隆林区定位站 1975—2000 年大气降水特征与森林对降水的截留作用的研究表明,青海云杉树干茎流量占降水量的 0.51%;当降雨量超过 12.0 mm 时,才开始产生树干茎流。树干茎流量占年降水量的比例可以忽略,因此我们在计算林冠截留量时没有考虑树干茎流。

4 结果与分析

4.1 林内穿透降雨和郁闭度的关系

在本实验观测期内(2008 年 6 月 12 日到 10 月 8 日),共观测到降雨 36 次,其中两次观测的样地总降雨截留量出现负值,分别为: -46.00 mm、-7.80 mm,我们认为出现了异常,这两次观测数据舍去。剩余观测的降雨次数 34 次,总降雨量 264.36 mm,平均每次降雨 7.78 mm。观测期间由于其中 2 个雨量筒(24#、28#)的丢失,因此本文中没有用到这 2 个雨量筒的数据,可用的雨量筒数据是 18 组。Shachnovich 等^[2]在研究中认为,松树林(pine forest)的林内穿透降雨分布和林冠开阔程度没有关系。但是,在本研究中初步发现了林内穿透降雨和小尺度(雨量筒大小)冠层郁闭度存在着非线性的关系(图 3)。经过拟合,发现用所有的雨量筒数据拟合的效果并不好,其

拟合方程的 R^2 系数只有0.556。

在图 3 中发现有 2 个雨量筒(20#、40#)的平均穿透降雨均为 8.04 mm,要大于平均降雨量。对于出现的穿透降雨大于大气降雨量,使得冠层截留量为负的现象,在不少针对多种森林类型和气候条件下的冠层截留研究^[1,9,33~36]中都有报道,这些研究中出现负冠层截留量的原因大致有:由于降雨时受到风的影响导致了观测的降雨量减少^[37];降雨的空间异质性较大,而在实验样方外布置的集雨器因为

距离实验样方有一定的距离,所以导致观测的降雨量比冠层上方的要小^[33];实验样方内布置的集雨器距离冠层太近,使冠层上的雨滴在风的作用下能够滴落在集雨器内,导致了观测到的穿透降雨比实际要高^[1]。本研究出现的穿透降雨大于降雨量的现象不同于上面的 3 种典型情况。20#和 40#雨量筒对应的郁闭度分别为 91.64% 和 65.46%,通过对两个雨量筒的冠层照片(图 4)分析可知:因为这两个雨量筒的位置同时处于 2 棵青海云杉的冠层重叠部

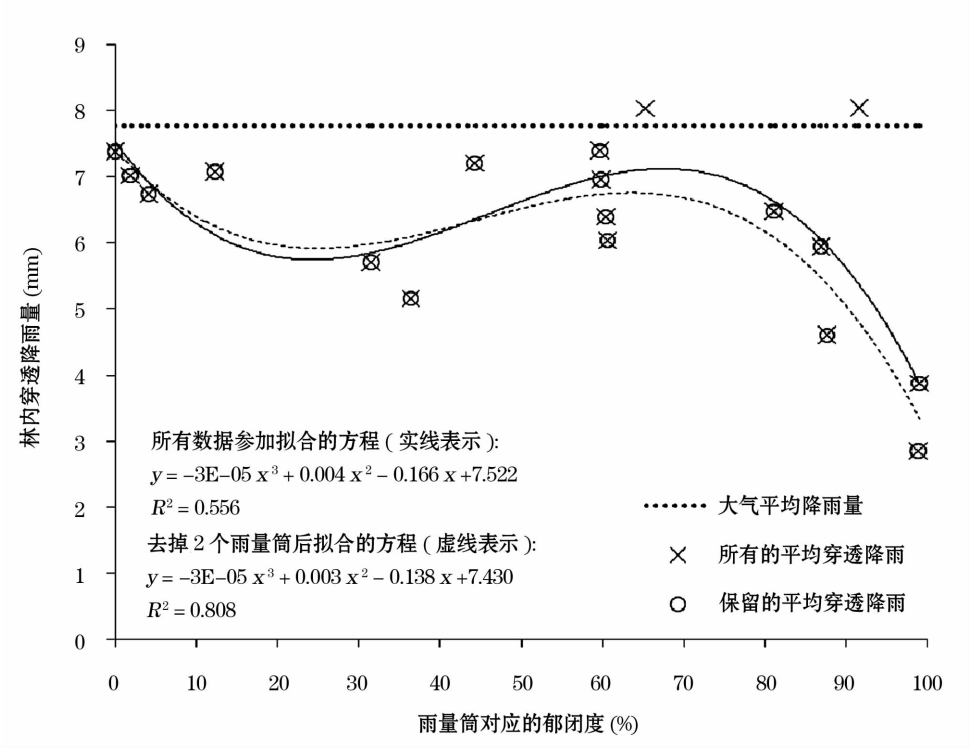


图 3 林内穿透降雨和冠层郁闭度的关系
Fig. 3 Relationship between mean throughfall and canopy closure

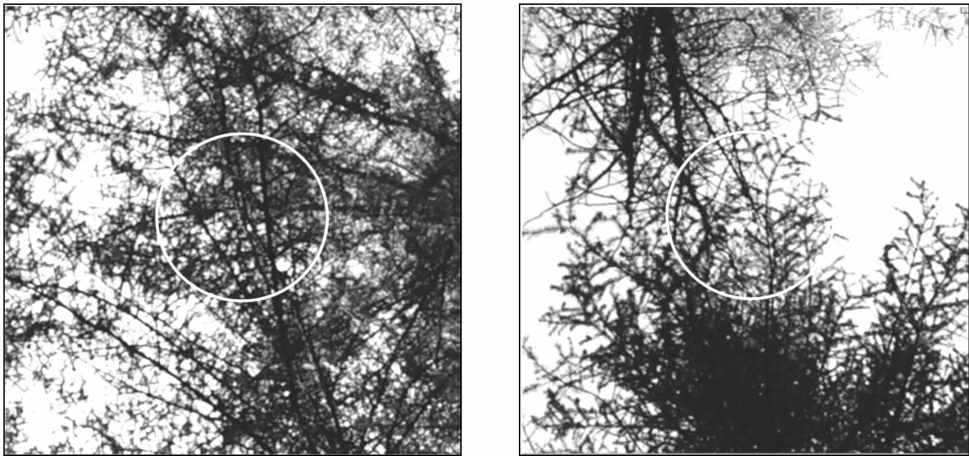


图 4 20#(左)和 40#(右)雨量筒对应的冠层照片,其中圆圈为雨量筒的位置

Fig. 4 Canopy images of 20# (left) rain gauge and 40# (right), the white circle represents the place of rain gauge

分,在冠层的边缘,由于树枝头部的低垂,使得冠层边缘对降雨产生了集聚效应,而冠层的叠加则导致了这种集聚效应被加强了。因此尽管郁闭度不同,却产生了相同的截留效果。

在本研究中,我们假设这种由于冠层重叠导致的负冠层截留,在整个水文实验样方内所占的比例非常小,只是特例现象。将这两组数据剔除后,重新对林内穿透降雨量和郁闭度用三次多项式进行拟合(图 3 虚线所示),发现拟合方程的 R^2 (复相关系数)由原来的 0.577 提高到了 0.808,可见此时的相关性更加明显。由图 3 可知林内的穿透降雨分布并不是和冠层郁闭度呈简单线性相关的。在大野口关滩森林站^[21]的实验样地内,青海云杉林林内穿透降雨随郁闭度的变化呈现三段式分布:在 0% ~ 65% 郁闭度,随郁闭度增加,林内穿透降雨先减少,后增加,大概在 30% 郁闭度时有一个林内穿透降雨的极小值。该值的产生是因为 30% 左右的郁闭度多分布在冠层边缘,而冠层边缘由于周围高大树木的影响,实际冠层上方降雨量要小于林外的对照降雨量;在 65% ~ 100% 郁闭度内,随郁闭度增加,林内穿透降雨呈现减小的趋势。这也可以解释为什么有的学者^[32,38,39]认为在一定郁闭度范围内,林冠截留量随郁闭度的增加而增大。

4.2 样地平均穿透降雨与降雨量的关系

通过对 34 次降雨事件的分析得知,样地平均穿透降雨量随着大气降水量的增加而增加(图 5),且样地平均穿透降雨量 P_i (mm) 与大气降水量 P (mm) 之间存在的明显的线性关系,拟合的方程如下:

$$P_i = 0.887 \times P - 0.847 \quad R^2 = 0.988 \quad (1)$$

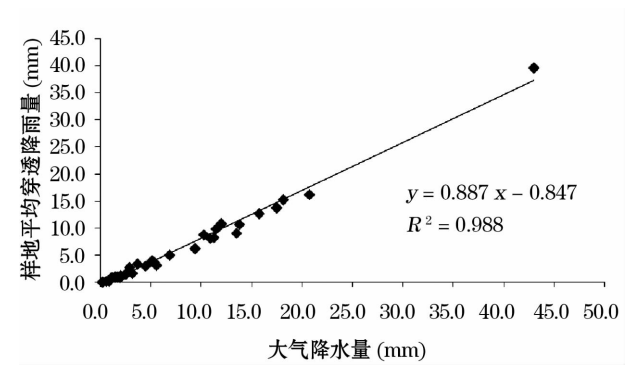


图 5 样地平均穿透降雨量和大气降水量的变化关系
Fig. 5 Relationship between mean throughfall in plot and precipitation

这种样地平均穿透降雨和大气降雨的线性关系

与金博文等^[38]的研究相一致。金博文等^[38]在研究祁连山排露沟流域的青海云杉林冠截留时,得到的样地穿透降雨量 P_i (mm) 与大气降水量 P (mm) 的回归方程为:

$$P_i = 0.8182 \times P - 1.2381 \quad R^2 = 0.9865 \quad (2)$$

这种极强的线性关系不仅存在于青海云杉林中,而且在不同的树种中都存在,如薛建辉等^[39]在研究 3 种亚高山森林群落时,发现了川滇高山栎林、灌竹林和闽江冷杉林的林内穿透降雨和降雨量的关系有着极强的线性相关。Staelens 等^[41]的研究表明在单个山毛榉树的林冠截留和降雨之间的关系也存在着线性相关,因此可以用降雨量来估测林内穿透降雨量的大小,只不过这种方法具有局限性,它与森林本身的形态特征、区域的气候条件和大气降水特征都有关系。

4.3 林冠截留量与降雨量的关系

林冠截留量与空旷地降雨量的关系比起透过雨量来说更为复杂些^[38],一般认为林冠截留量在一定范围内(冠层未饱和的情况下)随降水量的增加呈增加趋势,当降雨量超过冠层饱和值之后,林冠截留量增加很少或不增加^[20,32,38,40,42]。

通过对观测期间 34 次降雨事件的样地内平均截留数据分析,可以发现林冠截留与大气降雨量变化的关系(图 6)。在图 6 中可以看到:林冠截留量随降雨量的增加在一定范围内是增加的,但是当林冠截留量达到一个最大值之后,随着降雨量的增加,林冠截留量有了一个小幅度(约为 1 mm)的下降。由于本次实验观测到的大于 25 mm 的降雨事件(43 mm)只有一次,不能够有力的说明这种大降雨量情况下的林冠截留的减小是不是真的存在,希望在接下来的试验中能够获得更多的大降雨量降雨,来研究大降雨量下的林冠截留。

在其它研究中也可以看到这种大降雨量下的截留异常,如常学向等^[32]根据寺大隆林区 60 个样本,拟合得到方程:

$$P_i = -0.0518P^2 + 1.9339P - 3.3286 \quad R^2 = 0.9577 \quad (3)$$

他根据该公式计算得到,当降雨量为 18.67 mm 时,林冠截留量达到最大,只是对 60 个样本里面大降雨量出现的次数没有说明。虽然大降雨量事件在该地区出现的频率比较低,可是对于干旱和半干旱地区来说,它们占年降水量的比例是不可忽视的。

4.4 林冠降雨截留率

观测期间,林冠总截留量和总截留率分别为

58.68 mm、22.2%。与我们的观测结果相符合的,党宏忠等^[19]测定不同郁闭度下的青海云杉林得到现实林分林冠截留率的平均值为 19.36% ~ 23.96%,而金博文等^[38]的研究表明青海云杉林冠截留率在 22.6% ~ 34.5%。虽然不同的研究结果有细微的差别,但这与大多数学者关于充分郁闭的针叶林平均截留率大致均在 20% 以上这一结论基本吻合^[19]。

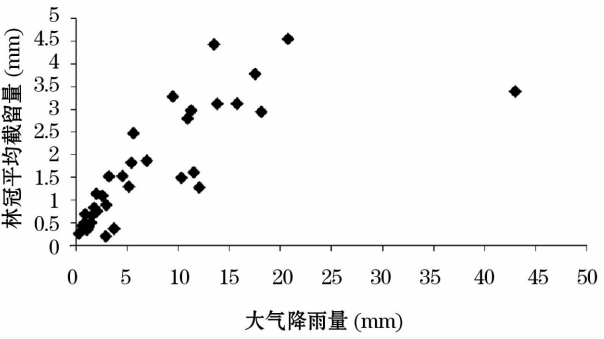


图 6 青海云杉林冠平均截留量与大气降雨量的关系
Fig. 6 Relationship between mean *Picea crassifolia* canopy interception and precipitation

从降雨事件与截留率的关系来看,在 0 ~ 1 mm 的降水量级,林冠截留率高达 75.15%,这与张学龙等^[20]的研究结果接近。我们进一步分析了观测期内林分对降雨的截留作用随降雨量的变化。从图 7 可以看出,青海云杉林对降水的截留率与降雨量呈负相关。

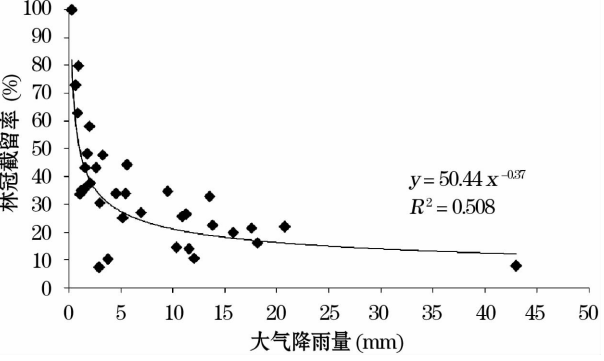


图 7 林冠截留率和大气降雨量的关系
Fig. 7 Relationship between canopy interception rate and precipitation

由图 7 可以看出,当降雨量较小时,青海云杉冠层截留率非常高,特别是当降雨量小于 1 mm 时,林冠截留率在 70% 以上,此时林冠对降水的分配作用较为明显,但是截留总量不高。当降雨量小于 5 mm

时,截留率随降水量的增加而下降的幅度较大,林冠对降水截留的效果最为明显,可以认为 5 mm 降水 是青海云杉林冠截留发生明显变化的一个拐点^[19], 此时的林冠截留率为 27.8%,之后随着降水量增加,截留率缓慢下降,到次降水达到 20 mm 时,截留率为 16.65%。当次降水达到 20 mm 后,林冠截留率随降雨量增加而减少的趋势更加缓慢。本实验观测的结果基本上符合党宏忠等^[19]提出的青海云杉林冠截留率过程分为 3 个阶段(快变期、渐变期和稳定期)的结论。

对于图 7 中左下角的 2 个偏离曲线较大的点,虽然降雨量不大,分别为 2.89 mm、3.7 mm,且降雨强度只有 0.56 mm/h、0.57 mm/h,但是截留率却比同雨量级的偏低。根据对数据的分析,我们认为这主要是因为这两次降雨时间主要发生在晚上,由于晚上的温度较低,且湿度较大,导致了林冠的蒸发减少,所以和同一雨量级减少的截留部分应该就是未蒸发的这一部分。并且在这种情况下,林冠的截留量容易达到饱和。

5 结论与讨论

以往在研究青海云杉林冠层截留特征时,林内降雨采集装置的布设多采用随机安放^[1,19,20],或按照规则格网^[38,42]来布置,这些采样方法都没有很好地考虑集雨器上方的冠层结构影响。本实验根据冠层郁闭度来确定雨量筒的安放位置,主要考虑了实验样地内郁闭度的影响。通过与规则格网采样的结果对比分析发现,根据郁闭度来布设雨量筒的位置是可行的,并且在降雨量较大的情况下比规则格网采样方法更加稳定。通过分析该方法得到的结果,我们可以得出以下结论:

(1) 青海云杉林内穿透降雨随郁闭度的变化呈现 3 段式分布:在 0% ~ 65% 郁闭度左右,随郁闭度增加,林内穿透降雨先减少,后增加;在 65% ~ 100% 郁闭度内,随郁闭度增加,林内穿透降雨呈现减小的趋势。

(2) 样地穿透降雨量 P_i (mm) 与大气降水量 P (mm) 之间存在的很强的线性关系,拟合的方程为: $P_i = 0.887 \times P - 0.847, R^2 = 0.988$ 。

(3) 在我们的实验样地内,青海云杉冠层截留率为 22.2%,且降雨截留率随降雨量的变化分为 3 个阶段:快变期、渐变期和稳定期。

(4) 林冠截留量随降雨量的增加,在一定范围内是增加的,在降雨量较大的情况下有可能会出

反常现象。

虽然该方法和规则格网采样方法相比有着一定的优势,但是还是存在着需要改进和注意的地方:首先,我们在郁闭度区间内较为均匀的布设了20个雨量筒,我们认为这些郁闭度下的雨量筒能够同等程度的影响整个样地截留,在实际中可能并不是这样的。因此,如何在样地内确定小尺度冠层郁闭度的分布规律和不同郁闭度对样地截留效应的影响权重,是我们在研究中应该注意的。

其次,该实验在布置的时候仅仅考虑了郁闭度的影响,没有考虑到相同郁闭度下的不同冠层结构,比如:树冠边缘和树冠内部,两棵树树冠边缘交叉部分等。这些都有可能影响到实验的结果。如何定量化的来确定这些因素对观测结果的影响,是下一步研究工作的重点

参考文献(References):

- [1] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 2 903-2 920.
- [2] Shachnovich Y, Pedro R B, Pua B. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 349: 168-177.
- [3] Guo Mingchun, Yu Pengtao, Wang Yanhui, *et al.* Rainfall interception model of forest canopy: A preliminary study [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1 633-1 637. [郭明春, 于彭涛, 王彦辉, 等. 林冠截持降雨模型的初步研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1 633-1 637.]
- [4] Wei Sanping, Wang Li, Wu Faqi. Simulation of interception quantity by Black Locust canopy in Loess Hilly and Gully Region [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(1): 26-33. [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.]
- [5] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, *et al.* A predictive model of rainfall interception of rainfall by forests I: Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine[J]. *Agricultural Meteorology*, 1971, 9: 367-384.
- [6] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1979, 105(443): 43-55.
- [7] Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 170: 79-86.
- [8] Bryan J B. Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern Mexico [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1994, 68: 133-143.
- [9] Valente F, David J S, Gash J H C. Modeling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 190: 141-162.
- [10] Limousin J M, Rambal S, Ourcival J M, *et al.* Modeling rainfall interception in a Mediterranean Quercus ilex ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 357: 57-66.
- [11] Liu Jiagang. Intercepted process of rainfall in forest canopy [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1987, 9(2): 140-144. [刘家冈. 林冠对降雨的截留过程[J]. 北京林业大学学报, 1987, 9(2): 140-144.]
- [12] Liu S G. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies [J]. *Ecological Modelling*, 1997, 99: 151-159.
- [13] Xiao Q F. A new approach to modeling tree rainfall interception [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(23): 29 173-29 188.
- [14] Liu Jiagang, Wan Guoliang, Zhang Xuepei, *et al.* Semi-theoretical model of rainfall interception of forest canopy [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(2): 2-5. [刘家冈, 万国良, 张学培, 等. 林冠对降雨截留的半理论模型[J]. 林业科学, 2000, 36(2): 2-5.]
- [15] Wang Jinye, Liu Xiande, Jin Bowen, *et al.* Research on change law of hydrologic *Picea Crassifolia* forests in Qilian mountains [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16(suppl.): 43-45. [王金叶, 刘贤德, 金博文, 等. 祁连山青海云杉林调节林内水分变化研究[J]. 西北林学院学报, 2001, 16(增刊): 43-45.]
- [16] Fu Huien. The primary discussion of the relationship among climate change, water resources and forests in Qilian mountains (north slope) [C] // Chinese Forest Ecosystem Localization Research. Shenyang: Press of Northeast Forestry University, 1994: 288-291. [付辉恩. 气候变化与祁连山(北坡)水资源、森林关系的初步探讨[C] // 中国森林生态系统定位研究. 沈阳: 东北林业大学出版社, 1994: 288-291.]
- [17] Che Kejun, Fu Enhui, Wang Jinye. The structure and function of the water conservation forest ecosystems in Qilian mountains [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(5): 29-37. [车克钧, 傅恩辉, 王金叶. 祁连山水源林生态系统结构与功能的研究[J]. 林业科学, 1998, 34(5): 29-37.]
- [18] Wang Jinye, Wang Yilin, Jin Bowen, *et al.* Studies on regulating function of forest hydrology and microclimate in arid and semi-arid area of west China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(5): 120-125. [王金叶, 王艺林, 金博文, 等. 干旱半干旱区山地森林的水分调节功能[J]. 林业科学, 2001, 37(5): 120-125.]
- [19] Dang Hongzhong, Zhou Zefu, Zhao Yusen. Study on forest interception of *Picea Crassifolia* [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(4): 60-64. [党宏忠, 周泽福, 赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究[J]. 水土保持研究, 2005, 19(4): 60-64.]
- [20] Zhang Xuelong, Luo Longfa, Jing Wenmao, *et al.* Study on the distribution effect of canopy interception of *Picea Crassifolia* forest in Qilian mountains[J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25

- (6): 678-683. [张学龙, 罗龙发, 敬文茂, 等. 祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应[J]. 山地学报, 2007, 25(6): 678-683.]
- [21] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, *et al.* Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe river basin: Scientific objectives and experiment design [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与实验方案[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 897-914.]
- [22] Li Yongning, Zhang Binlan, Qin Shuying, *et al.* Review of research and application of forest canopy closure and its measuring methods[J]. *World Forestry Research*, 2008, 21(1): 40-46. [李永宁, 张宾兰, 秦淑英, 等. 郁闭度及其测定方法研究与应用[J]. 世界林业研究, 2008, 21(1): 40-46.]
- [23] Bai Yunqing, Hao Wenkang, Jiang Yiyin, *et al.* Tree Measurement [M]. Haerbin: Northeast Forestry University Press, 1987. [白云庆, 郝文康, 蒋伊尹, 等. 测树学[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1987.]
- [24] Meng Xianyu. Tree Measurement [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996. [孟宪宇. 测树学[M]. 哈尔滨: 中国林业出版社, 1996.]
- [25] Jennings S B, Brown N D, Sheil D. Assessing forest canopies and understory illumination: Canopy closure, canopy cover and other measures[J]. *Forestry*, 1999, 72: 59-73.
- [26] Korhonen L, Korhonen K T, Rautiainen M, *et al.* Estimation of forest canopy cover: A comparison of field measurement techniques[J]. *Silva Fennica*, 2006, 40(4): 577-588.
- [27] Zhu Jiaojun. Method for measurement of Optical Stratification Porosity (OSP) and its application in studies of management for secondary forests[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1 229-1 233. [朱教君. 透光分层疏透度测定及其在次生林结构研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1 229-1 233.]
- [28] Zhu J J, Matsuzaki T, Gonda Y, *et al.* Estimation of Optical Stratification Porosity (OSP) in a pine coastal forest with different thinning intensities using hemispherical photographic silhouettes[J]. *Bulletin of the Faculty of Agriculture-Niigata University*, 2000, 53(1): 55-70.
- [29] Guevara-Escobar A, Tellez J, Gonzalez-Sosa E. Use of digital photography for analysis of canopy closure[J]. *Agroforestry Systems*, 2005, 65: 175-185.
- [30] Macfarlane C, Coote M, White D A, *et al.* Photographic exposure affects indirect estimation of leaf area in plantations of *Eucalyptus globules* Labill [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2000, 100: 155-168.
- [31] Samba S A N, Camire C, Margolis H A. Allometry and rainfall interception of *Cordyla pinnata* in semi-arid agroforestry parkland, Senegal[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 154: 277-288.
- [32] Chang Xuexiang, Zhao Aifen, Wang Jinye, *et al.* Precipitation characteristic and interception of forest in Qilian mountain[J]. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(3): 274-280. [常学向, 赵爱芬, 王金叶, 等. 祁连山林区大气降水特征与森林对降水的截留作用[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 274-280.]
- [33] Manokaran N. Stemflow, throughfall and rainfall interception in a lowland tropical rain forest in peninsular Malaysia [J]. *The Malaysian Forester*, 1979, 42(3): 174-201.
- [34] Langkamp P J, Farnell G K, Dalling M J. Nutrient cycling in a stand of *Acacia holosericea* A. Cunn. ex G. Don. I. Measurement of precipitation, interception, seasonal acetylene reduction, plant growth and nitrogen requirement[J]. *Australian Journal of Botany*, 1982, 30: 87-106.
- [35] Lloyd C R, De O, Marques F A. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 42: 63-73.
- [36] Veneklaas E J, Van Ek R. Rainfall interception in two tropical montane rain forests, Colombia [J]. *Hydrological Processes*, 1990, 4: 311-326.
- [37] Crockford R H, Johnson M E. Some errors in the measurement of precipitation, throughfall and stemflow and the implications for estimation of interception [C] // Hydrology and Water Resources Symposium, Hobart, Tasmania. Conference Publication No. 86/13. Institute of Engineers; Australia, 1983: 236-242.
- [38] Jin Bowen, Wang Jinye, Chang Zongqiang, *et al.* A study on hydrologic function of canopy of *Picea Crassifolia* in Qilian mountains[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16(suppl.): 39-42. [金博文, 王金叶, 常宗强, 等. 祁连山青海云杉林冠层水文功能研究[J]. 西北林学院学报, 2001, 16(增刊): 39-42.]
- [39] Xue Jianhui, Hao Qilin, Wu Yongbo, *et al.* Relationship among canopy interception, throughfall and precipitation in three types of subalpine forest communities[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2008, 32(3): 9-13. [薛建辉, 郝奇林, 吴永波, 等. 3种亚高山森林群落林冠截留量及穿透雨量与降雨量的关系[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 9-13.]
- [40] Ge Shuanglan, Niu Yun. Research on water balance of *Picea Crassifolia* forests in Qilian mountains[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2004, 63(6): 29-31. [葛双兰, 牛云. 祁连山青海云杉林水量平衡的研究[J]. 防护林科技, 2004, 63(6): 29-31.]
- [41] Staelens J, Schrijver A D, Verheyen K, *et al.* Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: Influence of foliation, rain event characteristic, and meteorology[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22: 33-45.
- [42] Liu Wenxia. The relationship between rainfall and interception by canopy of *Picea Crassifolia* forest[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2004, 39(3): 341-344. [刘雯霞. 青海云杉林冠截留与大气降水的关系[J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(3): 341-344.]

A Study of Interception of *Picea Crassifolia* Based on Different Canopy Closure

TAN Junlei^{1,2}, MA Mingguo¹, CHE Tao¹, BAI Yunjie^{1,2}

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Qilian Mountain is the main region of water conservation of many inland river basins, such as Shiyang River Basin, Heihe River Basin and Shule River Basin. As the main constructive species, *Picea Crassifolia* plays an important role in hydrological processes especially in a watershed scale. Therefore, it is meaningful to make a study of the redistribution of precipitation of *Picea Crassifolia*, especially the interception. Many scholars had studied the canopy interception characteristics. In most of these studies, however, rain gauges were installed in study plot accordingly by random or regular method. Those two methods do not take into account the canopy structure, which will not be easy to bring about representative result. The effect of canopy closure on top of rain gauges was not taken into account in both of these two methods. In this paper, a new method was developed: the rain gauges were installed according to canopy closure and the closure above each gauge is well-proportioned. Synchronously, rain troughs were installed in experiment plot according to the regular method, which would be used for a contrast. In order to estimate canopy closure, an ordinary digital camera was employed. The photographs from the digital camera were processed base on the ENVI (software of image processing). Five conclusions could be obtained based on the analysis of 34 groups of data collected during the observation. Firstly, the relationship between throughfall in plot and canopy closure is non-linear. Secondly, mean throughfall in plot increased with precipitation, and they had a strong linear relationship. Thirdly, within certain precipitation range, canopy interception increased with precipitation, otherwise, it decreased. Fourthly, the percentage of interception of *Picea Crassifolia* in total precipitation is 22.2%. Finally, the method that rain gauges are installed according to canopy closure is viable.

Key words: *Picea Crassifolia*; Canopy closure; Throughfall; Canopy interception.