

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.05.004

# 植物截留观测方法综述

王 文, 诸葛绪霞, 周 炫

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:**植物的截留观测可以分为林冠截留观测与地面枯枝落叶层截留观测两方面,对林外总降雨量、林下透落雨量、枯落物截留量、树干茎流量以及植被特征等各具体相关观测项目的观测方法进行了较为全面的总结,从中可以看出,各项的观测方法、观测点布设、与截留相关的植被参数估计方法等较为多样化,没有统一、标准的方法.在此基础上,提出了减小观测误差的相关建议.

**关键词:**降水;截留;观测;实验水文学

中图分类号: S715

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2010)05-0495-10

植物对雨水的截留作用指由于地面植物的枝叶、地表枯落物的拦截,导致部分降水无法参与径流形成或地面以下各种水分的运动过程,而以蒸发形式回归大气的作用.植物对雨水的截留,是流域产流、产沙、化学物质迁移转化等诸多物理过程的一个重要环节.一般认为,截留损失在研究大暴雨或大洪水时可以忽略,但对流域水量平衡计算非常重要.例如,在湿润森林地区截流损失量通常占年降水量的 10% ~ 30%<sup>[1-3]</sup>,在某些降水量偏少的地区截流损失量可以达到 40% ~ 50%<sup>[4]</sup>,在某些干旱地区的草被也可截留 30% 的年降水量<sup>[5]</sup>.可见截留损失在某些环境下对降雨产流过程具有重大影响,因此在一些水文模型(如 DHSVM 模型<sup>[6]</sup>)中有专门的模块处理截留过程.

研究植物截留作用对于研究土地利用/覆盖类型变化对流域水文过程的影响这一热点问题非常有意义.很多研究表明,林冠覆盖率的增加通常会导致流域产流量的减少<sup>[7]</sup>,森林砍伐可能导致洪峰流量的增大<sup>[8]</sup>,草场的森林化则会降低洪峰流量<sup>[9]</sup>.而全球气候变化也会导致植被覆盖率的变化,进而引发水文过程的变化.要量化地描述这些影响的发生机理,必须对植物的截留作用有清楚的认识.

植物的截留观测可以分为林冠截留观测与地面枯枝落叶层截留观测两方面.林冠截留观测主要包括林外总降雨量  $P_G$ 、林下透落雨量  $P_T$  及树干茎流量  $F_S$  这 3 个变量的观测,由  $P_G$  减去  $P_T$  及  $F_S$ ,即求得林冠截留量  $I_C$ .地面枯枝落叶层截留量  $I_L$  则可以通过观测  $P_T$ 、透过枯枝落叶层下渗到土壤中的水量,然后由  $P_T$  减去下渗水量求得.由于森林截留量的大小与林冠、枯枝落叶等植被的特征有关,因此,植被特征的观测也是截留观测中不可缺少的一部分.此外,为了满足复杂截留模型的需要,截留观测还可能会用到气温、湿度、辐射及风速风向等气象数据,这些数据可以较容易地通过自动气象观测站获得,因此本文不涉及降雨之外的气象数据的观测.

对植物的截留研究已有很长的历史,早在 19 世纪末期就有很多研究者开展了相关的观测工作<sup>[10]</sup>.在过去 100 多年中,植物截留观测一直是实验水文学的重要组成部分,方法也在不断丰富和完善,从完全的人工观测到用专用仪器对某些项目的自动观测,从地面逐个样点观测到从空中的流域尺度遥感观测.然而,关于截留观测仍未形成一个系统性的方法体系.因此,本文通过全面回顾国内外相关研究成果,以求对植物截留观测方法形成较为全面的认识,为今后相关研究工作提供借鉴.由于植物截留过程受多方面因素的影响,室内试验很难有效模拟这一过程,仅有少数截留观测试验是在室内进行的<sup>[11-12]</sup>,因此本文讨论的观测方法主要针对野外观测.

收稿日期: 2009-12-11

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2007490911);国家自然科学基金(40771039);教育部重大科技项目(308012)

作者简介: 王文(1967—),男,江苏姜堰人,教授,博士,主要从事环境变化对水文过程的影响及水文遥感研究. E-mail: ww.wang@126.com

## 1 林外总降雨量 $P_G$

林外总降雨量  $P_G$  (gross precipitation) 指在林外空地或树冠之上观测到的降雨量. 常用雨量观测仪器有 3 种: 人工雨量器、虹吸雨量计、翻斗式雨量计. 人工雨量器靠人工读取雨量值, 观测时间间隔通常为 1 d; 后 2 种为自动记录, 最短观测时间间隔可达 1 min. 标准雨量器、雨量计的口径为 20 cm. 翻斗式雨量计与固态存储器相结合, 分辨率可以达到 0.1 mm, 适于长期无人观测, 但费用较高, 所以在实际研究中, 人工雨量器的使用仍很普遍.

观测  $P_G$  通常使用 1~2 个固定雨量计. 雨量计一般放置在林地附近开阔的地方, 也有少数研究者将其放置在树冠之上. Gash 等<sup>[13]</sup>曾比较过这 2 种不同位置的观测结果, 认为它们观测结果相当一致, 但是, 将雨量计放在树冠之上可能受风的影响较大, 而放在开阔地则可能对于树冠处降水的代表性略差, 尤其是当开阔地距树冠的位置较远时.

## 2 林下透落雨量 $P_T$

### 2.1 观测设施

林下透落雨量  $P_T$  (throughfall) 指直接穿过林冠的, 以及降落到叶面、枝干上再滴落下来的雨水.  $P_T$  的观测是最容易出现较大误差的一项截留观测内容.

观测  $P_T$  时普遍使用雨量计. 由于林冠枝叶密度通常很不均匀, 为了减小误差, 透落雨的采集面积要尽量大, 也就是要尽量多的雨量计. Helvey 等<sup>[14]</sup>认为, 在美国东部的硬木林, 要使  $P_T$  截留观测误差小于 5%, 在林木生长季节需要 15 个雨量计, 休眠期需要 6 个. Czarnowski 等<sup>[15]</sup>在 1 个夏季硬木落叶林的试验表明, 要有 30 个雨量计才可以将  $P_T$  观测误差控制在 5% 以内. Rodrigo 等<sup>[16]</sup>认为  $P_T$  的采集面积要大于 0.2 m<sup>2</sup> (相当于 6~7 个直径为 20 cm 的雨量计), 从而使数据误差小于 5%. 在实际观测试验中, 不同研究者根据林地特点及样地大小不同, 设置从数个到数十个不等数目的雨量计, 最多可达 163 个<sup>[17]</sup>. 少数研究者直接采用口径为 20 cm 左右的盛水桶承接透落雨, 并通过称重折算单位  $P_T$ <sup>[18]</sup>, 但这种做法可能会造成较大误差, 尤其对于较小的降水事件. 为了减小雨量计放置位置对观测结果的影响, 有的研究者定期或不定期 (如每 2 周, 或每场降雨后) 系统或随机地改变雨量计位置<sup>[19-20]</sup>. 各个雨量观测值的算术平均值即为  $P_T$ .

使用雨量计测雨时, 透落雨空间分布不均匀性对观测结果有很大影响. 相比之下, 承雨槽由于具有较大的集雨面积, 在截留观测中有明显优势. Crockford 等<sup>[21]</sup>曾在 20 m × 20 m 的样地内, 用 9 个 20 cm 直径的标准雨量计, 以及 3 个 5 m × 0.22 m, 1 个 20 m × 0.22 m 楔形承雨槽进行了 27 场大小不等的降水事件中的透落雨观测. 结果表明, 雨量计观测数据的方差平均是承雨槽的 6 倍, 承雨槽的集雨量比雨量计平均大 9%, 由雨量计观测到的截留率是 30%, 而用承雨槽观测到的截留率是 11%. 因此, 大量研究者使用承雨槽, 以增加集雨面积<sup>[1, 22-28]</sup>, 有些研究者还同时使用了雨量计与承雨槽<sup>[26-29]</sup>. 承雨槽一般长 50~600 cm, 宽 10~25 cm, 大多为 U 形或 V 形. 少数研究者采用了 20 cm 或更小直径的半圆形 PVC 管采集透落雨<sup>[31]</sup>. 尽管 PVC 管具有太浅、雨水可能会溅出等缺点, 但是 McJannet 等<sup>[31]</sup>比较了直径 100 mm 的半圆形 PVC 管与有 V 形底、150 mm 深的承雨槽, 发现二者没有显著差别. 承雨槽可以与自记雨量计、翻斗式自动计数器相连自动记录其收集的雨量, 或与集水容器相接, 再通过称重或水位记录仪等方式来折算单位透落雨量. 少数研究者采取收集全部透落雨的方式进行观测. 如, Calder 等<sup>[32]</sup>设计了一种透落雨收集方法, 用绳子在样地内相邻树干的 1 m 高处结成 1 个网, 然后将塑料膜铺在其上. 降在膜上的全部透落雨被导入 1 个集水沟中, 用翻斗式自动计数器记录其总量. Teklehaimanot 等<sup>[33]</sup>采用类似的方式收集树间的透落雨, 但将塑料膜铺在木制框架上. 王鸣远等<sup>[34]</sup>在 9.2~19.0 m<sup>2</sup> 的样地内, 用水泥抹面, 再铺设塑料薄膜, 收集透落雨, 用自记径流仪记录其流量过程. 但是, 采用塑料薄膜 (尤其是在水泥抹面的情况下) 大面积收集全部透落雨的观测方式会导致其下的植物根系无法充分吸收水分, 影响其生长, 从而影响透落雨长期观测结果的真实性. 王安志等<sup>[12]</sup>在室内进行单株树木的截留观测试验时, 在树高 50 cm 处按树冠投影用木板制作承雨盘, 承雨盘设有出流口, 用 V 形槽测流仪自动测量出口断面的流量过程, 以记录树冠截留量. 还有个别研究者<sup>[18]</sup>采取了比较简单的办法, 用若干盛水桶承接透落雨, 每次降雨后人工测量盛水桶内盛水体积, 再除以盛水桶口径面积, 求得林下透落雨量. 这些观测方式存在的主要问题是, 在雨水收集过程中, 会有较大的蒸发损失和沾湿损失 (即雨水沾在槽体表面而不流入收集容器

中)。为此,Lundberg等<sup>[35]</sup>曾设计了一套利用称重传感器测量截留蒸发量的装置,其透落雨测量采用的是2个5 m长的V形槽,V形槽之间的夹角为60°,以免雨水击溅出去;并且,称重传感器对整个V形槽连同所集雨水一起称重,以避免沾湿损失,但这种装置的观测结果会受风力及坠落枯枝落叶的影响。

不论采用哪种观测方式(尤其是采用承雨槽等大面积集雨装置),都需要注意避免枯落物对雨水收集的影响。可以通过在承雨槽内设网状过滤层以减小枯落物对槽底汇水的影响,并且要定期清理枯落物。

## 2.2 观测点布设

观测点设置对透落雨量的观测结果有很大影响。观测点设置有2种方式:随机布点与系统布点。系统布点法将样地划分为若干规则格网或剖面线,然后均匀地在每个格网内,或沿剖面线布设集雨设施<sup>[2,3,27,29]</sup>;随机布点法则将透落雨采集装置随机地放置在试验区,并定期(如每2周)或根据降雨情况不定期地改变位置<sup>[19,20,36]</sup>,这样可以避免系统误差。在某些研究中,2种方式被同时采用,如Cuartas等<sup>[23]</sup>在采用6个6 m长的承雨槽,连接成1个36 m长的观测系统进行透落雨量观测的同时,也采用了随机布点的方式进行对比观测。此外,有研究者根据郁闭度来布设雨量计的位置<sup>[37]</sup>,或以单株树木为研究对象进行观测,在林冠下以树干为中心呈同心圆均匀布设雨量观测点<sup>[38]</sup>。

Holwerda等<sup>[39]</sup>比较了沿剖面线随机固定放置雨量计与每2~3 d随机改变雨量计位置这2种布点方式,发现二者的透落雨量观测均值相近。Zimmermann等<sup>[40]</sup>就透落雨观测中的采样方法及采样点布设问题进行了模拟对比试验,认为系统采样与随机采样的差别不大。

## 3 树干茎流量 $F_s$

树干茎流量(stemflow)指降落并积蓄在树木的叶、枝及树干上的雨水,在其重力超过了表面张力作用时,其中的一部分沿树枝、树干流到树木根部形成的水流。要注意的是,有人将树干内部液流(stem sap flow)也称为树干茎流。

一片林地的总茎流量  $F_s$  取决于树种、林分郁闭度、林龄、树皮的性质、树木的分枝角等多种因素,而代表性树木的选择对估算精度有较大影响。有的研究者在样地(如30 m×30 m)内选若干株代表性树木<sup>[41]</sup>,有的则按不同树径(如每隔3~4 cm为1个径级)各选择2~3株<sup>[25]</sup>。

进行  $F_s$  测定时,一般用直径约3 cm的软槽(可以纵向切割软管,但保持其末端完整,以接入集水容器),在代表性树木自地面以上0.3~0.5 m处向上沿树干螺旋状绕1~2周<sup>[13,41]</sup>或者环状/衣领状环绕1周<sup>[25,42]</sup>,一侧边缘嵌入树皮之内或订在树皮上,中间的缝隙用密封胶封严,下端与集水容器相连。容器可以是人工称重的水桶/水袋<sup>[18,25,43]</sup>,或者与翻斗式自动计数器相连的自动计重器<sup>[24,44-45]</sup>。雨强较小的地区可以与雨量计相连测重,或者在每次降雨后,通过人工或自动量取集水容器中的水位,换算出集流量<sup>[46]</sup>。

在获得代表性树木的单株茎流量资料后,如何将其准确地换算为茎流水深是个难题。较为常见的做法有:根据林分密度<sup>[47]</sup>,按林木茎级加权平均<sup>[25]</sup>;根据树冠投影面积<sup>[48]</sup>。Hanchi等<sup>[49]</sup>提出了首先建立样地内代表性树木茎流量与树林DBH(胸径)之间的回归关系,然后计算样地内所有树木的茎流量,进而换算样地的茎流水深。

小灌木由于茎杆较细而且经常多叉,其透落雨量与茎流量观测都很复杂,用常规办法难以将透落雨量与茎流量有效分开。作物茎流量测定也存在类似困难。Bui等<sup>[50]</sup>将铝薄膜螺旋状地环绕在高粱作物茎杆上,并将茎流收集杯分别固定在茎杆上,以此测量高粱作物的茎流量。Van Dijk等<sup>[51]</sup>采用了类似的采集装置测量玉米作物的茎流量,同时,他们还采用了将农作物砍下直接插入瓶中的方式来收集玉米作物茎流量。Butler等<sup>[52]</sup>在观测小麦的茎流量时,则采用若干无底的框子(220 mm×113 mm)置于小麦植株行下,并将行下地面用乳胶密封,以观测行下的透落雨量与茎流总量,同时用承雨槽观测行间透落雨量,二者的差值即视为小麦的茎流量。Paltineanu等<sup>[53]</sup>将塑料袋与玉米作物茎杆相连接以测定茎流量,袋中的水用便携泵抽出称重。Serrato等<sup>[54]</sup>专门设计了1个针对小灌木的由两部分组成的采集装置,一部分通过环绕在小灌木根部的环状金属膜,另一部分通过四周加框、平铺在地上的金属膜,分别将透落雨量和茎流量采集到埋入地中的2个集水瓶内。杨志鹏等<sup>[55]</sup>参考Serrato等<sup>[54]</sup>的方法,进行了毛乌素沙地沙柳灌丛的穿透雨量和树干茎流量的观测。

树干茎流量采集时要注意:(a)茎流量采集管不能太窄,以免水流溢出或被杂物堵住;也不能开口太宽,以免收集到透落雨滴。(b)茎流量采集能力(翻斗式计数器)或采集容器的大小要足够,要考虑到可能最大茎

流量,以免溢出.采集容器溢出的情况在台风降雨地区尤其容易出现,为此,周光益等<sup>[56]</sup>曾针对有强降水的热带林地区专门设计了一套茎流量收集装置.

## 4 枯落物截留量

传统的植物截留研究集中在树冠截留观测方面,很少考虑地面枯落物的截留作用.枯落物截留量指蓄积在枯落物上并被蒸发掉的雨水.广义的枯落物截留量还可以包括草被(青草与枯草)的截留雨量.

相对于树冠截留量而言,枯落物截留量更难准确测定.目前常见的直接观测枯落物截留量的方法是在林内布设的雨量计上叠放一圆形铁圈纱网,在纱网上覆盖与林地相同厚度的原状枯枝落叶,与没有装枯枝落叶的雨量计观测值之差即为枯落物截留量<sup>[57-58]</sup>.但是这种做法使枯枝落叶层完全脱离了与土壤层的水分联系,其蒸发状况也与自然状态很不同,因此测定的枯落物截留量难以反映真实状况.Gerrits等<sup>[59]</sup>专门设计了1个埋入地下的测定枯落物截留量的室外装置,其上部为1个填满枯落物的可以透水的容器,与地表平齐;下部是1个集水容器,二者都通过重力感应装置连续称重.这样,每次降水发生时,降水穿过上层容器枯落物层时的截留量与进入下层容器的下渗量可以同时被连续记录下来.这一装置尽管比用“雨量计+纱网”的方法接近真实自然环境,但由于枯落物层还是脱离了土壤层,因此与真实状况仍有较大差别,而且装置相对复杂,稳定性还需要改进.鲍文等<sup>[60]</sup>采用直接在林内地面采样测量的方法,取林内地面枯落物样品6个,测定其每次降水前后含水量,计算地面枯落物层对每一次降水的截留量.但这种方式难以避免采样差异带来的误差.

枯落物截留量很难准确测定,而枯落物的持水能力观测相对容易.其通常做法是,首先采集野外的枯落物样本,可以通过设置多个标准地,在每块标准地内系统地采样,如沿对角线方向布设5个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方<sup>[61]</sup>,或均匀设置若干个 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 或 $1\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的凋落物收集器<sup>[62]</sup>.在样本采集中,可以对未分解层和半分解层分别采样,然后,在实验室内先将样本风干(或烘干)称重,再浸泡称重,浸泡前后的质量差即为持水能力<sup>[61-63-64]</sup>.这种试验能反映对枯落物涵养水源方面的作用,但并不能有效说明枯落物在降水过程中的截留效应,尤其是不能反映其动态特性.因此,Putuhena等<sup>[11]</sup>尽量保持原样,对不同厚度、覆盖度的松树林、桉树林的枯落物及草被进行多个采样,然后在实验室内,通过人工降雨,同时在枯落物样本层下放置集水装置,进行不同样本的持水能力观测,并以降水停止 $10\sim 20\text{ min}$ 后的蓄水量作为枯落物的持水能力.

## 5 植被特征

很多研究结果表明,植被特征对截留量有很大影响,因此植被特征观测也是截留观测的一个不可缺少的组成部分.与截留相关的森林植被特征包括:林木生理特性、叶面积指数(LAI)、郁闭度、自由透雨系数、持水能力等.对于灌木而言,影响截留的重要特征主要是灌木林冠面积、高度及体积<sup>[65]</sup>.

### 5.1 林木生理特性

在分析不同植被截留特性的差异时,需要对森林结构(树种组成、林分密度、林龄、林分断面面积等)、树冠结构(冠层厚度、冠层高度、投影面积、树枝的数量、冠层树枝分叉的几何形态等)、树叶特性(叶面倾角、叶面积等)、树皮特性(厚度、粗糙度、孔隙度、纹理、树皮的吸水性能及干燥速率等)、枯落物层的厚度与现存量进行测量,因为很多研究表明这些特性与树冠的排水、持水能力等有关.测量这些特性时,可以针对代表性树种,按树干径级选择标准树木直接测量,但有些特性(如树皮特性)难以定量描述.

### 5.2 叶面积指数(LAI)

LAI是计算植物冠层截留量时很常用的1个参数.LAI测量方法包括直接测量法和间接测量法.

直接测量法是通过采集植株的树叶或落叶,或通过建立树叶质量与胸径之间的回归方程,直接测量或推算叶面积,再计算LAI.在采集一颗植株的树叶后,可以利用方格计算法、求积仪测定法、称重法、叶面积测定仪等测量叶面积.叶面积测定仪有扫描方式与光学成像式两类.前者通过扫描叶片,计算其面积.常用仪器有:CI-202便携式叶面积仪、LI-3000台式或便携式叶面积仪、AM-300手持式叶面积仪.后者通过拍摄叶片图像,然后处理分析软件获取叶片面积、形状等数据.主要仪器有:Windias图像分析系统、SKYE叶片面积图像分析仪、Decagon-Ag图像分析系统、WinFolia多用途叶面积仪等.通过采集叶片进行LAI测量的工作量很大,仅能用于反映局部植株特征,且采集叶片多数对树木具有毁坏性.根据树叶质量与胸径回归方程推算LAI

时,必须针对研究区树木建立特定的方程,这样做工作量也比较大。

LAI 间接测量方法有三类:辐射测量法、鱼镜头成像测量法及遥感法。辐射测量法通过测量辐射透过率来计算 LAI。常用仪器有 LAI-2000 冠层分析仪、TRAC、AccuPAR、SunScan 冠层分析系统、Demon 和 Sunfleck Ceptometer 等。这些仪器主要由辐射传感器和微处理器组成,它们通过辐射传感器从冠层下部获取太阳辐射透过率、冠层空隙率、冠层空隙大小或冠层空隙大小分布等参数来计算 LAI。辐射测量法的优点是测量简便快速,但容易受天气影响,通常需要在晴天工作。鱼镜头成像测量法是通过获取和分析植物冠层的半球数字图像来计算 LAI。常用仪器主要有 CI-100 植物冠层图像分析仪、WinScanopy 林地冠层分析仪、HemiView 数字植物冠层分析系统等。这些图像分析系统通过鱼镜头和数码相机从冠层下部获取冠层图像,然后利用软件对冠层图像进行分析,推算 LAI。这种方法需要均一的光环境,如黎明、黄昏或阴天。遥感法利用航空或卫星传感器测量地物的反射光谱,进而根据统计或光学模型估算 LAI。遥感方法效率更高,可以测定一年中森林冠层 LAI 的季节变化,但该方法通常要与地面观测结果相结合,如 Bulcock 等<sup>[66]</sup>根据卫星遥感测得的 LAI 与在地面用 LAI-2000 测得的 LAI 之间的线性关系,估算研究区的 LAI,进而估算植被最大贮蓄能力。

需要注意的是, LAI 的定义众多<sup>[67]</sup>,如地面单位面积上叶面积总和、单位面积上叶片投影面积、单位面积上叶片最大投影面积、单位面积上叶面积总和的一半。因此,在使用某个方法测定 LAI 之前一定要明确其含义。

### 5.3 郁闭度

郁闭度指森林中乔木树冠遮蔽地面的程度,等于林冠垂直投影面积与林地面积之比。其测定方法很多,传统的方法有树冠投影法、测线法及样点统计法<sup>[68]</sup>,有依靠仪器的冠层分析仪法,还有适于大范围监测的遥感解译法。冠层分析仪(如 LAI-2000)主要用来测定叶面积指数,也可以应用于测定林冠郁闭度<sup>[69]</sup>,它对天空条件要求比较严格,测定时要避免阳光直射,要求在均匀的阴天或早晚进行。对于大面积的郁闭度调查,可通过航空相片或高分辨率的卫星图像进行判读<sup>[70]</sup>。

### 5.4 自由透雨系数( $p$ )

$p$  是很多降雨截留模型中用到的 1 个树冠参数,它等于树冠在湿润过程中,透落雨量占总降水量的比例。其观测只能通过间接方法进行。一个简单的办法是,根据较小降雨事件(如降雨量小于 1.5 mm)中的林外总降水量与透落雨量之间的回归关系确定  $p$ <sup>[22, 29, 71]</sup>。还有一个办法是通过光学摄影,根据树冠间的缝隙率来确定  $p$ <sup>[19, 72]</sup>。通常认为  $p$  对于特定林分是个常量,但 Link 等<sup>[36]</sup>则认为,由于雨滴大小及风力作用的差异, $p$  在不同降水事件中的值是不同的。

### 5.5 冠层、枯枝落叶层的持水能力

植株冠层持水能力与枯枝落叶层持水能力是植物截留的 2 个重要参数。冠层持水能力由林冠结构、叶表面积指数,以及叶、枝、树干的表面持水能力决定,又受到风速、雨滴大小等因素的影响,因而不是 1 个固定的常数。不同研究者对冠层持水能力的定义有所不同。Horton 等<sup>[10]</sup>将其定义为林冠最大吸附量,以林冠投影面积上的水层厚度表示,这个定义是最广泛使用的。类似地, Klaassen 等<sup>[73]</sup>更明确地将其定义为树冠快速排水过程停止后的最大可能蓄水量; Rutter 等<sup>[74]</sup>将其定义为使冠层饱和的最小截留雨量; Calder<sup>[75]</sup>在其提出的单层截留模型中,将其定义为每个冠层单元上能保持的雨滴的最大数量与雨滴平均体积之积。

小型植物持水能力的测定通常也采用类似于枯枝落叶层持水能力的量测方法<sup>[51]</sup>,也就是将植株从底部砍下,称其质量,然后将其模拟淋雨或直接浸入水中,再称重,2 次质量差即为持水能力。但对于高大树冠的持水能力或实际蓄水量缺乏有效的观测方法。对于高大树冠,一种测定持水能力的简易方法是,截取少量枝叶,让其充分吸水、称重,然后再以估算的林冠生物量推求林冠最大容水量<sup>[76-77]</sup>。但采用这种方法时,如何准确地由局部持水能力推求全树冠持水能力是个难题。为此, Llorens 等<sup>[78]</sup>提出了利用在树冠下向上拍摄的照片,结合局部树冠、树枝持水能力的量测,推求全树冠截留量的方法。Hancock 等<sup>[79]</sup>提出了根据枝树截留雨水后的变形来连续观测树冠蓄水量变化的方法; Bouten 等<sup>[80]</sup>设计了 1 个根据树冠干湿差异对微波信号衰减程度的影响确定实际树冠持水量的装置。利用这种装置,可以在充分降水时,测定树冠持水量作为树冠持水能力。Calder 等<sup>[81]</sup>利用伽马射线源对树冠(可以同时有多个树冠)进行不同层次的水平扫描,同时在树冠另一侧用 1 个接收装置接受伽马射线,根据其衰减情况观测树冠蓄水量。这个系统需要 2 个塔,分别用于安装伽马射线发射与接收装置,并用计算机控制其合适的位置。Friesen 等<sup>[82]</sup>设计了一种装置,通过测定由截留量变化

导致的树干压力变化,估算树冠截留量,但这些观测方法费用较高,并且技术比较复杂.

冠层持水能力还可以间接确定.许多研究者根据多场降水事件(前期8~12h无降雨,以保证树冠基本干燥)的截留量观测数据,以总降水量-透落雨量(或净雨量)相关关系为基础,间接确定冠层持水能力,但具体做法有所不同.

一个简单的间接确定冠层持水能力的办法是,建立透落雨量 $P_T$ 与总降水量 $P_G$ 之间的回归方程,则 $P_T=0$ 时的 $P_G$ 即为冠层持水能力 $C_{\max}$ <sup>[40]</sup>.这种方法没有考虑蒸发的影响,因此,Leyton等<sup>[71]</sup>提出以总降水量为横坐标,以透落雨量为纵坐标,绘散点图,画一条斜率为 $(1-p_t)$ 的直线( $p_t$ 为降水量转化为树干茎流量的比例).该线仅穿过最上方的若干个散点,而将其他所有散点罩在该线下方.假定该线代表了蒸发量最小时透落雨量与总降水量之间的关系,则该线与纵轴的截距(负值)代表了树冠持水能力.这个方法被广泛使用<sup>[19-29]</sup>.

Jackson等<sup>[48]</sup>同样利用以总降水量 $P_G$ 为横坐标,以透落雨量 $P_T$ 为纵坐标的散点图进行树冠持水能力估计,但他认为,这些散点可以分两部分来处理.对于不能使树冠蓄水饱和的降水事件, $P_G\sim P_T$ 之间呈斜率为 $p$ 的线性回归关系.呈这种线性回归关系的最大总降水量 $P'_G$ 可以从散点图上直观找到,相应的,可以算出对应的 $P'_T$ .而对于更大的降水事件, $P_G\sim P_T$ 之间呈斜率为1的线性回归关系,从而有

$$P'_T = P'_G - C_{\max}$$

也就是,冠层持水能力

$$C_{\max} = P'_G - P'_T$$

在Leyton等<sup>[71]</sup>及Jackson<sup>[48]</sup>的方法中,都存在对于关键数据点选取具有明显主观性的不足,并且,对于不同降水事件,冠层持水能力是有所不同的.因此,Klaassen等<sup>[73]</sup>提出根据截留量 $I(P_G-P_T)$ 与 $P_G$ 的散点图,在降水量 $P_G>P_S$ ( $P_S$ 为使树冠达到饱和时的降水量)时,拟合线性回归方程 $I=a+bP_G$ ,将 $a$ 视为平均持水能力,或者拟合指数函数方程 $I=X[1-\exp(-\gamma P_G)]$ (其中 $\gamma$ 为参数),然后将 $X$ 视为最大持水能力 $C_{\max}$ .

## 6 结 语

作为为实验水文学的重要组成部分,植物截留观测方法研究已经有100多年的历史,截留观测手段也不断丰富和完善,从初期的完全手工记录与观测,到现在采用自记观测、遥感观测,以及针对某些特定观测内容的观测仪器.最近Czikowsky等<sup>[83]</sup>尝试采用涡度相关系统估算亚马逊雨林区的森林截留量,其基本做法是比较林区雨后蒸发量与无雨条件下的蒸发量之差值,推算森林截留量.尽管如此,仍没有形成一个普遍认同的截留观测方法体系.

测量误差是截留观测中的最大问题.在各项观测量中,林外总降雨量是相对而言最容易准确测定的.即使如此,沾湿误差、风场变形误差可以分别导致2%~10%的降雨测量误差<sup>[84]</sup>,这些因素使中国标准雨量站降雨观测值的平均相对误差达到4%~15%<sup>[80]</sup>.其他项目测量中的不确定性就更大了,其中,最难准确观测的是林下透落雨量.如McJannet等<sup>[31]</sup>比较多个地点的承雨槽透落雨量观测值,发现每个地点的承雨槽观测值差别为2%~6%.Zimmermann等<sup>[40]</sup>认为,要使透落雨观测误差小于20%,对于小降水事件需要300个雨量计,对于几毫米以上的较大降水事件需要大约100个雨量计.对于异质性的冠层,要想得到误差小于5%的观测结果是不可能做到的.减小不确定性的办法是,增加雨量计或承雨槽的数量,以增大透落雨采集面积,合理设计集雨设施的摆放位置,并可以通过经常变换摆放位置避免固定位置造成的系统误差.枯落物的截留量也是难以准确测定的,因为它受到枯落物以及透落雨分布不均匀性的双重影响.树干茎流量相对容易测量,但将其换算为水深时也存在很大的不确定性.以上各项截留观测应该与对植物本身特性的观测相结合,这样才能从机理上正确地认识树干茎流的形成,但有些植物特性的定量化观测也是比较困难的.

观测误差是难免的,但在已发表文献中,观测误差问题很少被提及,读者只能根据透落雨采集方法、茎流量采集方法、研究期长度、数据采集频度等方面推测观测试验的数据质量,这是很多研究成果的明显不足,也是今后观测试验中应该注意的一个方面.

参考文献:

[1] ROWE L K. Rainfall interception by an evergreen beech forest Nelson, New Zealand[J]. J Hydrol, 1983, 66(1/4): 143-158.

- [ 2 ] 马雪华 杨茂瑞 胡星弼. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[ J ]. 林业科学, 1993, 29( 3 ): 199-206.( MA Xue-hua , YANG Mao-rui , HU Xing-bi. A study on hydrological function of subtropical plantations of *cunninghamia lanceolata* and *pinus massoniana* [ J ]. Scientia Silvae Sinicae, 1993, 29( 3 ): 199-206.( in Chinese ))
- [ 3 ] ASDAK C , JARVIS P G , VAN GARDINGEN P , et al. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of central Kalimantan , Indonesia[ J ]. Journal of Hydrology , 1998, 206( 3/4 ) : 237-244.
- [ 4 ] CALDER I , WILEY J , CHICHESTER S. Evaporation in the upland[ J ]. Agriculture Water Management , 1991, 20( 1 ) : 84-85.
- [ 5 ] DUNKERLEY D L , BOOTH T L. Plant canopy interception and its significance in a banded landscape , arid western New South Wales , Australia[ J ]. Water Resources Research , 1999, 35( 5 ) : 1581-1586.
- [ 6 ] WIGMOSTA M S , VAIL L W , LETTENMAIED P R. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[ J ]. Wat Resour Res , 1994, 30( 6 ) : 1665-1679.
- [ 7 ] SAHIN V , HALL M J. The effects of afforestation and deforestation on water yield[ J ]. J Hydrol , 1996, 178( 1/4 ) : 293-309.
- [ 8 ] BESCHTA R L , PYLES M R , SKAUGSET A E , et al. Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon , USA[ J ]. J Hydrol , 2000, 233( 1/4 ) : 102-120.
- [ 9 ] LANE P N J , BEST A E , HICKEL K , et al. The response of flow duration curves to afforestation[ J ]. J Hydrol , 2005, 310( 1/4 ) : 253-265.
- [ 10 ] HORTON R E. Rainfall interception[ J ]. Mon Weather Review , 1919, 47( 9 ) : 603-623.
- [ 11 ] PUTUHENA W M , CORDERY I. Estimation of interception capacity of the forest floor[ J ]. J Hydrol , 1996, 180( 1/4 ) : 283-299.
- [ 12 ] 王安志 刘建梅 裴铁番 等. 云杉截留降雨实验与模型[ J ]. 北京林业大学学报, 2005, 27( 2 ) : 30-35.( WANG An-zhi , LIU Jian-mei , PEI Tie-fan , et al. An experiment and model construction of rainfall interception by *Picea koraiensis*[ J ]. Journal of Beijing Forestry University , 2005, 27( 2 ) : 30-35.( in Chinese ))
- [ 13 ] GASH J H C , STEAWART J B. The evaporation from Thetford Forest during 1975[ J ]. J Hydrol , 1977, 35( 3/4 ) : 385-396.
- [ 14 ] HELVEY J D , PATRIC J H. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States[ J ]. Water Resour Res , 1965, 1( 2 ) : 193-206.
- [ 15 ] CZARNOWSKI M S , OLSZEWSKI J L. Number and spacing of rainfall-gauges in a deciduous forest stand[ J ]. Oikos , 1970, 21 : 48-51.
- [ 16 ] RODRIGO A , AVILA A. Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm fores[ J ]. Journal of Hydrology , 2001, 243( 3/4 ) : 216-227.
- [ 17 ] LLORENS P , DOMINGO F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions : a review of studies in Europe[ J ]. Journal of Hydrol , 2007, 335( 1/2 ) : 37- 54.
- [ 18 ] 张卓文 杨志海 张志永 等. 三峡库区莲峡河小流域马尾松林冠降雨截留模拟研究[ J ]. 华中农业大学学报, 2006, 25( 3 ) : 318-322.( ZHANG Zhuo-wen , YANG Zhi-hai , ZHANG Zhi-yong , et al. Canopy precipitation interception of massons pine stand in Lianxiahe small watershed in Three Gorges of Yangtze Rive[ J ]. Journal of Huazhong Agricultural University , 2006, 25( 3 ) : 318-322.
- [ 19 ] GASH J H C , MORTON A J. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss form Thetford Fores[ J ]. J Hydrol , 1978, 38( 1/2 ) : 49-58.
- [ 20 ] TOBON C , BOUTEN W , SEVINK J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall , stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia[ J ]. J Hydrol , 2000, 233( 1/2 ) : 40-57.
- [ 21 ] CROCKFORD R H , JOHNSON M E. Some errors in the measurement of precipitation , throughfall and stemflow and the implications for estimation of interception[ C ]//Institute of Engineers : Australia Hydrology and Water Resources Symposium , Conference. Hobart : Tasmania , 1983 : 236-242.
- [ 22 ] RUTTER A J , KERSHAW K A , ROBINS P C , et al. A predictive model of rainfall interception in forests I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pin[ J ]. Agricultural Meteorology , 1971, 9 : 367-384.
- [ 23 ] CUARTAS L , TOMASELLA J , NOBRE A , et al. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in central Amazonia : marked differences between normal and dry years[ J ]. Agricultural and Forest Meteorology , 2007, 145( 1/2 ) : 69-83.
- [ 24 ] PEREIRA F L , GASH J H C , DAVID J S , et al. Modelling interception loss from evergreen oak Mediterranean savannas : application of a tree-based modelling approach[ J ]. Agricultural and Forest Meteorology , 2009, 149( 3/4 ) : 680-688.
- [ 25 ] 董世仁 郭景唐 满荣洲. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留[ J ]. 北京林业大学学报, 1987, 9( 1 ) : 58-68.( DONG Shi-ren , GUO Jing-tang , MAN Rong-zhou. Throughfall , stemflow and canopy interception in a *pinus tabulaeformis* plantation of north China [ J ]. Journal of Beijing Forestry University , 1987, 9( 1 ) : 58-68.( in Chinese ))
- [ 26 ] 谭俊磊 马明国 车涛 等. 基于不同郁闭度的青海云杉冠层截留特征研究[ J ]. 地球科学进展, 2009, 24( 7 ) : 825-833.( TAN Jun-lei , MA Ming-guo , CHE Tao , et al. A study of interception of *Picea crassifolia* based on different canopy closure[ J ]. Advances in Earth Science , 2009, 24( 7 ) : 825-833.( in Chinese ))

- [ 27 ] 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.( ZHANG Xue-long , LUO Long-fa , JING Wen-mao , 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.( in Chinese ))
- [ 28 ] REID L M , LEWIS J. Rates , timing , and mechanisms of rainfall interception loss in a coastal redwood fores[ J ]. J Hydrol , 2009 , 375( 3/ 4 ) : 459-470.
- [ 29 ] HERBST M , ROSIER P T W , MCNEIL D D , et al. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous fores[ J ]. Agricultural and Forest Meteorology , 2008 , 148( 11 ) : 1655-1667.
- [ 30 ] LIU S. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies[ J ]. Ecological Modelling , 1997 , 99( 2/3 ) : 151-159.
- [ 31 ] MCJANNET D , WALLACE J , REDDELL P. Precipitation interception in Australian tropical rainforests : I. Measurement of stemflow , throughfall and cloud interception[ J ]. Hydrological Processes , 2007 , 21( 13 ) : 1692-1702.
- [ 32 ] CALDER I R , ROSIER T P W. The design of large plastic-sheet net rainfall gauges[ J ]. J Hydrol , 1976 , 30( 4 ) : 403-405.
- [ 33 ] TEKLEHAIMANOT Z , JARVIS P G , LEDGER D C. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing[ J ]. J Hydrol , 1991 , 123( 3/4 ) : 261-278.
- [ 34 ] 王鸣远 , 王礼先 . 三峡库区马尾松林分对降雨截留效应的研究[ J ]. 北京林业大学学报 , 1995 , 17( 4 ) : 74-81.( WANG Ming-yuan , WANG Li-xian. Effect of masson pine forestw on rainfall interception in the reservoir area of the Three Gorges of Yangtze Rive[ J ]. Journal of Beijing Forestry University , 1995 , 17( 4 ) : 74-81.( in Chinese ))
- [ 35 ] LUNDBERG A , ERIKSSON M , HALLDIN S , et al. New approach to the measurement of interception evaporation[ J ]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology , 1997 , 14( 5 ) : 1023-1035.
- [ 36 ] LINK T E , UNSWORTH M , MARKS D. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainfores[ J ]. Agric for Meteorol , 2004 , 124( 3/4 ) : 171-191.
- [ 37 ] 谭俊磊 , 马明国 , 车涛 , 等 . 基于不同郁闭度的青海云杉冠层截留特征研究[ J ]. 地球科学进展 , 2009 , 24( 7 ) : 825-833.( TAN Jun-lei , MA Ming-guo , CHE Tao , et al. A Study of interception of *Picea crassifolia* based on different canopy closure[ J ]. Advances in Earth Science , 2009 , 24( 7 ) : 825-833.( in Chinese ))
- [ 38 ] 王艳红 , 宋维峰 , 李财金 . 不同森林类型林冠截留效应研究[ J ]. 亚热带水土保持 , 2008 , 20( 3 ) : 5-10.( WANG Yan-hong , SONG Wei-feng , LI Cai-jin. Study on crown interception effect of different forest canopies subtropicala[ J ]. Soil and Water Conservation , 2008 , 20( 3 ) : 5-10.( in Chinese ))
- [ 39 ] HOLWERDA F , SCATENA F N , BRUIJNZEEL L A. Throughfall in a Puerto Rican lower montane rainforest : a comparison of sampling strategies[ J ]. J Hydrol , 2006 , 327( 3/4 ) : 592-602.
- [ 40 ] ZIMMERMANN B , ZIMMERMANN A M , LARK R , et al. Sampling procedures for throughfall monitoring : a simulation study[ J ]. Water Resour Res , 2010 , 46 : W01503.
- [ 41 ] 杨茂瑞 . 亚热带杉木、马尾松人工林的林内降雨、林冠截留和树干茎流[ J ]. 林业科学研究 , 1992 , 5( 2 ) : 158-162.( YANG Mao-rui. Interrelations of forest precipitation , crown interception and trunk stemflow in sub-tropical plantations of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana*[ J ]. Forest Research , 1992 , 5( 2 ) : 158-162.
- [ 42 ] RUTTER A J. Studies in the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions : I. Measurement of rainfall and interception[ J ]. J Ecol , 1963 , 51( 1 ) : 191-203.
- [ 43 ] ABOAL J R , MORALES D , HERNA'NDEZ M , et al. The measurement and modelling of the variation of stemflow in laurel forest in Tenerife , Canary Island[ J ]. J Hydrol , 1999 , 221( 3/4 ) : 161-175.
- [ 44 ] HERWITZ S R. Buttresses of tropical rainforest trees influence hillslope processes[ J ]. Earth Surf Process Landf , 1988 , 13( 6 ) : 563-567.
- [ 45 ] DUROCHER M G. Monitoring spatial variability of forest interception[ J ]. Hydrol Process , 1990 , 4( 3 ) : 215-229.
- [ 46 ] 张玲 , 王震洪 . 云南牟定三种人工林森林水文生态效应的研究[ J ]. 水土保持研究 , 2001 , 8( 2 ) : 69-73.( ZHANG Ling , WANG Zhen-hong. Hydrological and ecological effect of three man-made forests in muding county of Yunnan Province[ J ]. Research of Soil and Water Conservation , 2001 , 8( 2 ) : 69-73.( in Chinese ))
- [ 47 ] 黄承标 , 梁温宏 . 广西亚热带主要林型的树干茎流[ J ]. 植物资源与环境 , 1994 , 9( 4 ) : 10-17.( HUANG Cheng-biao , LIANG Wen-hong. Stemflow of main forest types in Guangxi subtropics[ J ]. Journal of Plant Resources and Environment , 1994 , 3( 4 ) : 10-17.( in Chinese ))
- [ 48 ] JACKSON I J. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical rainfores[ J ]. J Hydrol , 1975 , 24( 3/4 ) : 215-238.
- [ 49 ] HANCHI A , RAPP M. Stemflow determination in forest stand[ J ]. For Ecol Manage , 1997 , 97( 3 ) : 231-235.
- [ 50 ] BUI E N , BOX J E JR. Stemflow , rain throughfall , and erosion under canopies of corn and sorghum[ J ]. Soil Sci Soc Am J , 1992 , 56 : 242-247.

- [ 51 ] VAN DIJK A I J M ,BRUIJNZEEL L A. modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system[ J ]. Journal Hydrol 2001 247( 3/4 ) :239-262.
- [ 52 ] BUTLER D R ,HUBAND N D S. Throughfall and stem-flow in whea[ J ]. Agric for Meteorol ,1985 35( 1/4 ) :329-338.
- [ 53 ] PALTINEANU I C ,STARR J L. Preferential water flow through corn canopy and soil water dynamics across rows[ J ]. Soil Sci Soc Am J , 2000 64 :44-54.
- [ 54 ] SERRATO F B ,DIAZ A R. A simple technique for measuring rainfall interception by small shrub :interception flow collection box[ J ]. Hydrological Processes ,1998 12( 3 ) :471-481.
- [ 55 ] 杨志鹏 ,李小雁 ,孙永亮 ,等 .毛乌素沙地沙柳灌丛降雨截留与树干茎流特征[ J ]. 水科学进展 2008 19( 5 ) :693-698.( YANG Zhi-peng ,LI Xiao-yan ,SUN Yong-liang ,et al. Characteristics of rainfall interception and stemflow for *Salix psammophila* in Maowusu sandland ,northwest China[ J ]. Advances in Water Science 2008 19( 5 ) :693-698.( in Chinese ))
- [ 56 ] 周光益 ,吴仲民 ,李意德 ,等 .热带林茎流收集及计算方法探索[ J ]. 生态学杂志 ,1994 13( 5 ) :63-66.( ZHOU Guang-yi ,WU Zhong-min ,LI Yi-de ,et al. Collection and calculation methods for stemflow in tropical fores[ J ]. Chinese Journal of Ecology ,1994 13( 5 ) :63-66.( in Chinese ))
- [ 57 ] 赵鸿雁 ,吴钦孝 ,刘国彬 .黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[ J ]. 林业科学 2003 39( 1 ) :168-172.( ZHAO Hong-yan ,WU Qin-xiao ,LIU Guo-bin. Studies on soil and water conservation functions of litter in Chinese pine stand on loess plateau[ J ]. Scientia Silvae Sinicae 2003 39( 1 ) :168-172.( in Chinese ))
- [ 58 ] 郭剑芬 ,杨玉盛 ,林鹏 .木荷与杉木人工林枯枝落叶层水文生态功能[ J ]. 东北林业大学学报 2006 34( 4 ) :49-51.( GUO Jian-feng ,YANG Yu-sheng ,LIN Peng. Eco-hydrological function of forest floors in schima superba and *Cunninghamia lanceolata* Plantations [ J ]. Journal of Northeast Forestry University 2006 34( 4 ) :49-51( in Chinese ))
- [ 59 ] GERRITS A M J ,SAVENIJE H H G ,HOFFMANN L ,et al. New technique to measure forest floor interception :an application in a beech forest in Luxembourg[ J ]. Hydrol Earth Syst Sci 2007 11 :695-701.
- [ 60 ] 鲍文 ,包维楷 ,何丙辉 ,等 .岷江上游 23 年生油松纯林下凋落物与土壤截留降水的效应[ J ]. 水土保持学报 2004 18( 5 ) :115-119.( BAO Wen ,BAO Wei-kai ,HE Bing-hui ,et al. Interception effect of precipitation by litter and soil under 23-year artificial pinus tabulae formis forest in upper reaches of Minjiang Rive[ J ]. Journal of Soil Water Conservation 2004 18( 5 ) :115-119.( in Chinese ))
- [ 61 ] 吴钦孝 ,刘向东 ,苏宁虎 ,等 .山杨次生林枯枝落叶蓄积量及其水文作用[ J ]. 水土保持学报 1992 6( 1 ) :71-76.( WU Qin-xiao ,LIU Xiang-dong ,SU Ning-hu ,et al. The amount of accumulated litter of secondary mountain poplar forest and its hydrological function[ J ]. Journal of Soil and Water Conservation ,1992 6( 1 ) :71-76.( in Chinese ))
- [ 62 ] 朱金兆 ,刘建军 ,朱清科 ,等 .森林凋落物层水文生态功能研究[ J ]. 北京林业大学学报 2002 24( 5/6 ) :30-34.( ZHU Jin-zhao ,LIU Jian-jun ,ZHU Qing-ke ,et al. Hydro-ecological functions of forest litter layers[ J ]. Journal of Beijing Forestry University 2002 24( 5/6 ) :30-34.( in Chinese ))
- [ 63 ] 饶良懿 ,朱金兆 ,毕华兴 .重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[ J ]. 北京林业大学学报 2005 27( 1 ) :33-37.( RAO Liang-yi ,ZHU Jin-zhao ,BI Hua-xing. Hydrological effects of forest litters and soil in the Simian Mountain of Chongqing City[ J ]. Journal of Beijing Forestry University 2005 27( 1 ) :33-37.( in Chinese ))
- [ 64 ] 季冬 ,关文彬 ,谢春华 ,贡嘎山暗针叶林枯落物截留特征研究[ J ]. 中国水土保持科学 2007 5( 2 ) :86-90.( JI Dong ,GUAN Wen-bin ,XIE Chun-hua. Litters interception capability of dark coniferous in Gongga Mountain[ J ]. Science of Soil and Water Conservation 2007 5( 2 ) :86-90.( in Chinese ))
- [ 65 ] MARTINEZ-MEZA E ,WHITFORD W G. Stemflow ,throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs [ J ]. J Arid Environ ,1996 32( 3 ) :271-287.
- [ 66 ] BULCOCK H H ,JEWITT G P W. Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing for hydrological applications with a particular focus on canopy interception[ J ]. Hydrol Earth Syst Sci 2010 14 :383-392.
- [ 67 ] ZHENG G ,MOSKAL L M. Retrieving leaf area index( LAI ) using remote sensing[ J ]. Theories ,Methods and Sensors 2009 9 :2719-2745.
- [ 68 ] 林业部调查规划设计院 .森林调查手册[ M ]. 北京 :中国林业出版社 ,1981.
- [ 69 ] RAUTIAINEN M ,STENBERG P ,NILSON T. Estimating canopy cover in Scots pine stand[ J ]. Silva Fennica 2005 39( 1 ) :137-142.
- [ 70 ] 谭炳香 ,李增元 ,陈尔学 ,等 .Hyperion 高光谱数据森林郁闭度定量估测研究[ J ]. 北京林业大学学报 2006 28( 3 ) :95-101.( TAN Bing-xiang ,LI Zeng-yuan ,CHEN Er-xue ,et al. Estimating forest crown closure using hyperion hyperspectral data[ J ]. Journal of Beijing Forestry University 2006 28( 3 ) :95-101.( in Chinese ))
- [ 71 ] LEYTON L ,REYNOLDS E R C ,THOMPSON F B. Rainfall interception in forest and moorland[ C ]//SOPPER W E ,LULL H W. International Symposium on Forest Hydrology. Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar. New York : Pergamon Press ,1967 :163-178.

- [ 72 ] LLOYD C R , GASH J H C , SHUTTLEWORTH W J , et al. The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian rainforest [ J ]. *Agric for Meteorol* , 1988 , 43 ( 3/4 ) : 277-294.
- [ 73 ] KLAASSEN W , BOSVELD F , DE WATER E. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception [ J ]. *Journal of Hydrology* , 1998 , 212/213 : 36-50.
- [ 74 ] RUTTER A J , KERSHAW K A , ROBINS P C , et al. A predictive model of rainfall interception in forests I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine [ J ]. *Agricultural Meteorology* , 1971 , 9 : 367-384.
- [ 75 ] CALDER I. A stochastic model of rainfall interception [ J ]. *J Hydrol* , 1986 , 89 ( 1/2 ) : 65-71.
- [ 76 ] HERWITZ S R. Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees [ J ]. *J Hydrol* , 1985 , 77 ( 1/4 ) : 237-252.
- [ 77 ] CROCKFORD R H , RICHARDSON D P. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia : III. Determination of the canopy storage capacity of a dry sclerophyll eucalypt forest [ J ]. *Hydrol Process* , 1990 , 4 ( 2 ) : 157-167.
- [ 78 ] LLORENS P , GALLART F. A simplified method for forest water storage capacity measurement [ J ]. *J Hydrol* , 2000 , 240 ( 1/2 ) : 131-144.
- [ 79 ] HANCOCK N H , CROWTHER J M. A technique for direct measurement of water storage on a forest canopy [ J ]. *J Hydrol* , 1979 , 41 ( 1/2 ) : 105-122.
- [ 80 ] BOUTEN W , SWART P J F , DE WATER E. Microwave transmission , a new tool in forest hydrological research [ J ]. *J Hydrol* , 1991 , 124 ( 1/2 ) : 119-130.
- [ 81 ] CALDER I R , WRIGHT I R. Gamma ray attenuation studies of interception from Sitka spruce : some evidence for an additional transport mechanism [ J ]. *Water Resour Res* , 1986 , 22 ( 3 ) : 409-417.
- [ 82 ] FRIESEN J , VAN BEEK C , SELKER J , et al. Tree rainfall interception measured by stem compression [ J ]. *Water Resour Res* , 2008 , 44 , doi : 10.1029/2008WR007074.
- [ 83 ] CZIKOWSKY M J , FITZJARRALD D R. Detecting rainfall interception in an Amazonian rain forest with eddy flux measurements [ J ]. *J Hydrol* , 2009 , 377 ( 1/2 ) : 92-105.
- [ 84 ] SEVRUK B. Correction of precipitation measurements [ C ] // Workshop on the Correction of Precipitation Measurements. Zurich , Switzerland : ETH/AIHS/WMO , 1986 : 13-23.
- [ 85 ] 任芝花 , 王改利 , 邹风玲 , 等. 中国降水测量误差的研究 [ J ]. *气象学报* , 2003 , 61 ( 5 ) : 622-627. ( REN Zhi-hua , WANG Gai-li , ZOU Feng-ling , et al. The research of precipitation measurement errors in China [ J ]. *Acta Meteorologica Sinica* , 2003 , 61 ( 5 ) : 622-627. ( in Chinese ) )

## Methods for plant interception measurement

WANG Wen , ZHUGE Xu-xia , ZHOU Xuan

( *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,  
Hohai University , Nanjing 210098 , China* )

**Abstract :** The plant interception measurement can be roughly categorized into the canopy interception measurement and the litter interception measurement. A comprehensive review on experimental studies of the gross rainfall , throughfall , litter interception , stemflow and plant characteristics is presented. It is shown that the methods for the rainfall interception measurement are diversified in the layout of their instruments and the procedures for estimating parameters. There are no united and standard methods. On such a basis , some suggestions for reducing measurement errors are proposed.

**Key words :** precipitation ; interception ; measurement ; experimental hydrology