长三角地区毛竹林冠截留的影响因素

韩 诚，庄家尧，张金池，汪春林，刘 鑫，顾哲衍

（南京林业大学 森林资源与环境学院，江苏 南京 210037）

摘 要：为了探究毛竹林林冠截留与其影响因素之间的关系，于 2012 年 4 月至 2013 年 3 月，定位观测了毛竹林的林冠截留特征以及相关影响因子数据。结果表明，研究期内，长三角地区毛竹林的穿透雨率、树干茎流率和林冠截留率，分别占同期降雨总量的 60.6%，6.7%和 32.7%；林冠枝叶部分与树干部分的持水能力分别为 0.82 和 0.1 mm；引入叶面积指数作为林冠特征并与林冠截留进行分析，结果发现各月林冠截留总量随月平均叶面积指数的增加呈一定程度上增大的趋势，月平均林冠截留率随各月平均叶面积指数的增大而减小；各气象因子与毛竹林的林冠截留量的灰色关联度大小顺序为：降雨强度＞降雨量＞风速＞空气温度＞风向＞空气湿度，各气象因子与毛竹林的林冠截留率的灰色关联度大小顺序依次为：空气温度＞风向＞降雨量＞风速＞降雨强度＞空气湿度。

关键词：长三角地区；毛竹；穿透雨；树干茎流；林冠截留；叶面积指数；灰色关联度

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2014)03-0092-05 **中图分类号**：S718.5

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.018

Factors Influencing Canopy Interception of *Phyllostachy Edulis* Forest in Yangtze River Delta Region

HAN Cheng, ZHUANG Jia-yao, ZHANG Jin-chi, WANG Chun-lin, LIU Xin, GU Zhe-yan

(*College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu* 210037, *China*)

Abstract: In order to determine the relationship between influencing factors and canopy interception of *Phyllostachy edulis* forest, the canopy interception and influencing factors were studied with location fixed observation method from April 2012 to March 2013. Results showed that the throughfall, stemflow and canopy interception accounted for 60.6%, 6.7% and 32.7% of total precipitation during the study period. Canopy storage capacity and stem storage capacity of *Phyllostachy edulis* forest were 0.82 and 0.1 mm, respectively. Leaf area index(LAI) was introduced as a canopy characteristic and the correlation between LAI and canopy interception was analyzed. Canopy interception of each month increased with the increase in mean monthly LAI to some extent. Mean monthly canopy interception rate decreased with the increase of mean monthly LAI outstandingly. The environmental factors influencing canopy interception were evaluated by gray relational grade which showed an order as: rainfall intensity＞precipitation＞wind speed＞temperature ＞wind direction＞air humidity, while the order of the environmental factors influencing canopy interception rate, as evaluated with the same method, was: temperature＞wind direction＞precipitation＞wind speed＞rainfall intensity＞air humidity.

Keywords: **Yangtze River delta region**; ***Phyllostachy edulis***; **throughfall**; **stemflow**; **canopy interception**; **LAI**; **gray relational grade**

森林与水的关系是国内外众多生态学、水文学学者研究的核心议题之一。大气降水是水循环过程中重要的一环，而森林林冠是大气降水进入陆地循环系统的第一道作用层，林冠层改变降水的空间分布，成为穿透雨、树干茎流以及林冠截留 3 个部分，森林林冠对降水的这种再分配作用受到降雨特征、林分特征、林冠特征以及气象因子等多种因素的影响[1-2]。降雨通过林冠形成雨量和动能较小的穿透雨[3-4]，在有植被的坡地地表茎流系数为 6%～7%，而没有植被的坡地地表茎流系数为 13%[5]，可见森林林冠可以减少降水对地表的冲刷，对蓄水保土起到了重要的防护作用，树干茎流通常是研究中最易被忽视的一部

收稿日期：2013-07-07 修回日期：2013-07-10

资助项目：国家公益林行业重大专项“典型森林植被对水资源形成过程的调控研究”(201104005)；国家自然科学基金项目“安徽大别山区 GIS 支持下的土壤侵蚀模型研究”(31170663)；江苏省高等学校林学优势学科建设项目资助”(164010641)

作者简介：韩诚(1989—)，男(汉族)，江苏省徐州市人，硕士研究生，研究方向为森林水文。E-mail:85413629@qq.com。

通信作者：庄家尧(1969—)，男(汉族)，安徽省凤阳市人，副教授，主要从事森林水文、土壤侵蚀等方面研究。E-mail:nlzjiayao@njfu.edu.cn。

分水分，然而在许多地区，这部分少量的水分却构成了局部地区养分供给的重要途茎[6]，研究发现树干茎流中的离子量比降雨中的高，树干茎流中的营养成分是降雨中的 7.5 倍，是穿透雨中养分的 2.9 倍[7]。在水循环过程中蒸发的水分 1/3 来源于林冠层截持的降水[8]，林冠截留的降水是森林水分储备重要的一部分，根据以往的资料显示，林冠层每年截留的降雨占年降雨量的 15%～45%[9]。毛竹是中国特有的一种植被，长江以南生长着世界上 85%的毛竹，它广泛分布于丘陵、低山山麓地带。中国学者对毛竹林生态水文效应的研究较多，但多集中于降雨再分配的比例，对毛竹林冠截留影响因子的研究较少。本文采用定位观测的方法，对影响毛竹林冠截留效果的林冠特征、气象因子等因素进行探讨，旨在为今后林冠截留模型的研究提供更为科学的数据支撑和理论基础，为水源涵养林的建设提供依据。

1　试验区概况

试验在南京市东善桥林场铜山分场进行(31°35′—31°39′N，118°50′—118°52′E)，属北亚热带季风气候区，年均气温 15.1 ℃，年均降水量 1 100 mm，无霜期 229 d，年日照时数 2 199 h，海拔在 38～388 m，气候温和湿润，四季分明，水热资源较丰富。地形为苏南丘陵，土壤类型为黄棕壤。林分类型以杉木(*Cunninghamia lanceolata*)，马尾松(*Pinus massoniana*)，麻栎(*Quercus acutissima*)，毛竹(*Phyllostachy edulis*)林和茶(*Camallia sinensis*)园为主。毛竹林样地平均树高 10.8 m，平均胸茎 8.3 cm，郁闭度 0.89，平均冠幅 2.7 m，密度 2 025 株/hm²，样地坡度 17°，坡向 NE。

2　研究方法

2.1　气象因子与林冠层结构特征的测定

在试验样地外约 20 m 处的空旷地设置 4 台 RG3—M 翻斗式自记雨量计(美国 ONSET 公司)，持续测定(每 5 min 自动采集一次数据)林外降雨量，雨量取平均值。利用 PortLog 便携式自动气象站(美国产)对空气温度、湿度、风速及风向等气象因子进行测定(每 15 min 测 1 次)。叶面积指数的测定采用 LAI－2200(LI－COR，USA)植被冠层分析仪，每月中旬在无太阳直射的晴朗早晨和傍晚或阴天测量。

2.2　穿透雨量测定

在样地(20 m×20 m)设置 3 个集水槽(200 cm×20 cm×20 cm)收集穿透雨，布设集水槽时需要除去周围过高的草本植被，将降雨导入翻斗式自记雨量筒(量程：0.5 mm)，最后根据集水槽的面积以及 3 个集水槽的收集到的穿透雨量换算出林内穿透雨量。

2.3　树干茎流量测定

实验采用喷塑铁皮由模具制成半圆形容器，两个半圆形容器围绕同等直茎树干合围，形成树干茎流收集装置，铁皮与树干之间用玻璃胶消除缝隙，装置下方有出水口，通过皮管将收集到的雨水导入下方放置的翻斗式雨量计中，通过翻斗式雨量计(精度：0.5 mm)来计算收集到的树干茎流量。按 2 cm 一个茎级划分分布，选取样地中 9 株样木装置仪器进行观测，利用加权平均法推算出单位面积林分的树干茎流量。

2.4　林冠截留计算

按照水量平衡公式：$I=P-S-T$　　(1)

式中：I——树冠截留量(mm)；P——大气降雨量(mm)；S——树干茎流量(mm)；T——穿透雨量(mm)。

2.5　林冠截留与其影响因素的灰色关联分析

灰色关联分析法的基本思想主要是以两个系统之间的数据序列为基础，按其发展趋势的相似或相异程度，根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。若几何曲线的形状越接近相应序列之间的关联度就越大，反之就越小，并依此可以判断引起该系统发展的主要因素和次要因素[10]。灰色关联度的计算公式为：

$$\xi_i(k)=\frac{\min\min|X_0(k)-X_i(k)|+\rho\times\max\max|X_0(k)-X_i(k)|}{|X_0(k)-X_i(k)|+\rho\times\max\max|X_0(k)-X_i(k)|} \quad (2)$$

$$r_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\xi_i(k) \quad (3)$$

式中：$\xi_i(k)$——X_0 和 X_i 在 k 指标时的关联系数；$|X_0(k)-X_i(k)|$——比较数列与参考数列各对应点的绝对差值；ρ——分辨系数，当 越小，分辨率就越大，$\rho\in[0,1]$，一般 ρ 取值 0.5；r_i——灰色关联度，关联度越大说明子序列与母序列变化的态势越一致则表明该序列对母序列的影响也就越大。

3　结果与分析

3.1　研究区降水特征

基于 2012 年 4 月至 2013 年 3 月的降雨数据，按两场降雨事件之间的间隔时长超过 8 h 的原则[11]，总计降雨事件 111 次，累计降雨量 849 mm，略低于研究区年平均降雨，原因是研究期间 6，7 月降雨低于同期降雨较多，6 月降雨量只有 39.9 mm 低于国家

基准站的降水历史均值 166.2 mm。8 月降雨量 148.9 mm(17.53%)为各月降雨量最大值,研究区冬季降雨较多,占据年降雨量的 27.33%。场降雨最大值 63.3 mm,最小值 0.1 mm,平均场降雨量 7.6 mm,标准差 10.5 mm,变异系数达 136.65%。小雨占总降雨次数的 75.68%,降雨强度≤1 mm/h 的场降雨占总降雨次数的 56.76%,研究区以小雨量、低强度的降雨事件为主。根据该地区单场降雨特征,将降雨类型划分为 8 个雨量级:≤1,1~2,2~3,3~5,5~10,10~20,20~30 和≥30 mm。

3.2 穿透雨和树干茎流变化特征分析

观测期内长三角地区毛竹林穿透雨量为514.5 mm,占总降雨量的 60.6%,场降雨的穿透雨率变幅为 0~83.57%,场降雨的平均穿透雨率为 43.67%,场降雨的穿透雨率变异系数为 57.35%。研究期间,穿透雨量随降雨量的增大而增加,两者之间呈极显著的线性关系,穿透雨量和降雨量的回归方程为:

$$y=0.677x-0.555 \quad (R^2=0.980) \qquad (4)$$

式中:y——穿透雨量(mm);x——降雨量(mm)。

当降雨量较小时,林冠层可以截留全部降雨,降雨量超过一定范围后,会形成林内穿透雨,形成林内穿透雨的最小降雨量可以根据关系方程计算出,即为 x 轴截距 0.82 mm,这个值被 Leyton 等[12]当做林冠枝叶部分的持水能力。在 10~20 mm 雨量级时,穿透雨量最大为 161.5 mm,穿透雨率随雨量级的增大而增大,但增长幅度趋于平稳,在≥30 mm 雨量级达到最大值 67.48%(图 1)。

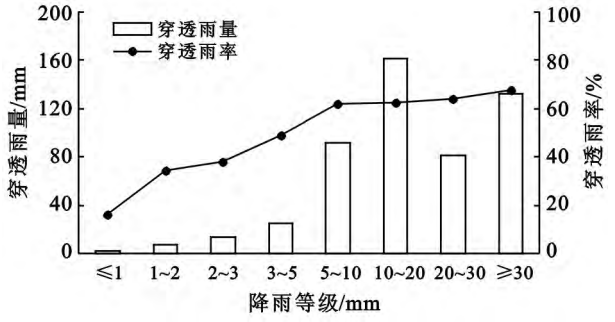


图 1 不同雨量级的穿透雨量和穿透雨率

树干茎流这部分水分占据总降雨量的比例较小,但在森林水文功能以及生态系统养分循环过程中所起的作用却十分重要。研究期内,树干茎流总量 56.9 mm,占研究期内总降雨量的 6.7%,场降雨的树干茎流率变幅为 0~5.46%,平均场降雨的树干茎流率为 5.47%。各场次的树干茎流量与降雨量具有显著的线性关系,回归方程为:

$$y=0.090x-0.100 \quad (R^2=0.875) \qquad (5)$$

式中:y——树干茎流量(mm);x——降雨量(mm)

形成树干茎流的最小雨量以及树干持水能力可以根据树干茎流量与林外降雨量的关系方程确定,X 轴截距为形成树干茎流的最小雨量(1.1 mm),Y 轴截距为树干持水能力(0.1 mm)。树干茎流率随雨量级的增大而增加,树干茎流率在≤1 mm 雨量级时最小为 2.03%,在≥30 mm 雨量级达到最大值 8.13%,树干茎流量最大值(19.1 mm)出现在 10~20 mm 雨量级(图 2)。

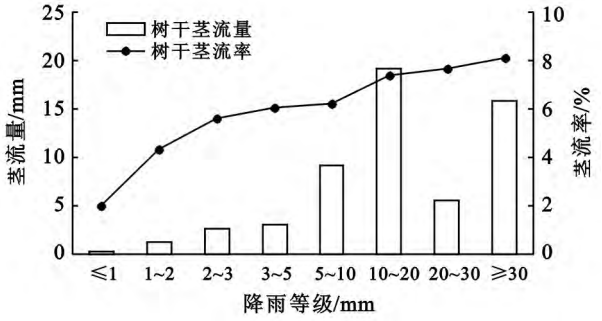


图 2 不同雨量级的树干茎流量和茎流率

3.3 林冠截留与降雨量的关系

研究期内,林冠截留量为 278.6 mm,林冠截留率占同期总降雨量的 32.7%。试验期间的场林冠截留量和降雨量具有明显线性相关关系,相关性达显著水平,回归方程如下:

$$y=0.245x+0.635 \quad (R^2=0.845) \qquad (6)$$

式中:y——林冠截留量(mm);x——降雨量(mm)。

111 场降雨的平均降雨强度为 1.7 mm/h,Gash 模型假定降雨期间饱和林冠的平均蒸发速率和平均降雨强度的比值保持稳定,并且比值等于降雨量和林冠截留量关系方程的斜率[13],因此,可以估算出饱和林冠的平均蒸发速率为 0.42 mm/h。林冠截留率随降雨等级的增大而减小,在≤1 mm 雨量级时林冠截留率最高,占降雨量的 82.03%(图 3)。

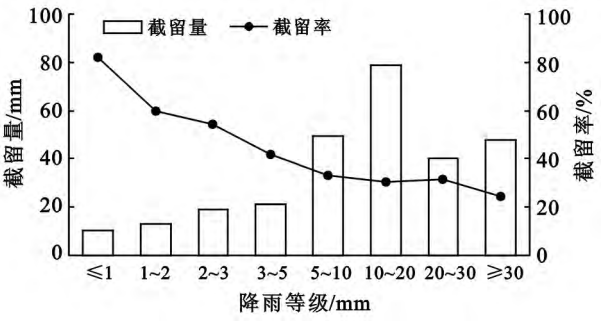


图 3 不同雨量级的林冠截留量和林冠截留率

3.4　叶面积指数与林冠截留的关系

林冠层结构特征对林冠截留也有显著的影响，选取叶面积指数代表林冠结构特征与林冠截留进行分析。由图 4 可知，除去 12 月，2 月因降雨量高导致林冠截留总量过高的原因，各月林冠截留总量随月平均叶面积指数的增加呈一定程度上增大的趋势。月平均林冠截留率与各月平均叶面积指数的关系，一定程度上表现为随叶面积指数的增大林冠截留率减小，月平均林冠截留率和月均叶面积指数的关系式：

$$y=-3.702x+46.49 \quad (R^2=0.350) \qquad (7)$$

式中：y——林冠截留率(%)；x——叶面积指数。

理论上说，同一树种叶面积指数高的林分林冠截留率也应较高，但研究区叶面积指数较高的月份，降雨量较之叶面积指数低的月份高出较多，因此林冠截留率反而低于叶面积指数低的月份。

3.5　林冠截留与气象因子的关系

林冠截留是个复杂的过程，不仅受林冠层结构特征的影响，同时气象因子对其也有间接的影响。气象因子主要包括降雨量、降雨强度、林内空气温度、湿度、风速和风向等，为了确定各个因子对林冠截留影响的重要性，对各因子影响作用进行排序，采用最大值化的处理方法，将林冠截留量和各气象因子的原始值进行无量纲处理，分别将林冠截留量和林冠截留率作为参考数列，各气象因子作为比较数列，采用灰色关联法分析，分析结果见表 1。灰色关联度的值越大，说明比较数列与参考数列两者之间的发展趋势越接近，也就是说比较数列对参考数列的影响就越大。从表 1 中可以看出，降雨强度对林冠截留量的影响程度最大，空气温度对林冠截留率的影响最强，空气湿度对两者的影响程度均为最小。毛竹林的林冠截留量与其影响因子的灰色关联度大小顺序依次为：降雨强度＞降雨量＞风速＞空气温度＞风向＞空气湿度，毛竹林的林冠截留率与其影响因子的灰色关联度大小顺序依次为：空气温度＞风向＞降雨量＞风速＞降雨强度＞空气湿度。

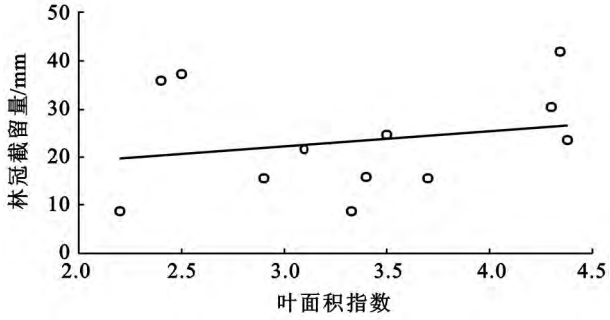


图 4　月平均叶面积指数与各月林冠截留总量的关系

表 1　林冠截留量、截留率与气象因子的灰色关联度

项目	降雨量	降雨强度	空气湿度	空气温度	风速	风向
截留量	0.767 6	0.803 1	0.467 7	0.650 6	0.778 0	0.571 4
截留率	0.597 8	0.586 6	0.558 9	0.684 7	0.591 0	0.648 6

3.6　结果讨论

2012 年 4 月至 2013 年 3 月研究期内，长三角地区毛竹林穿透雨量为 514.5 mm，树干茎流总量 56.9 mm，分别占总降雨量的 60.6%和 6.7%。毛竹林的树干茎流率 6.7%显著高于曹云等[14]、邱治军等[15]、Hofhansl 等[7](0.7%～1%)对其他树种的研究结果，这与毛竹树干光滑，树干部分的持水能力仅为0.1 mm 等因素有关，形成树干茎流的最小降雨量为 1.1 mm。林冠枝叶部分的持水能力(形成穿透雨的最小降雨量)为 0.82 mm，介于王晓燕等[11]国内学者的研究结果 0.35～1.45 mm，产生差异的原因与树种、林龄、林冠层特征等因素有关。

毛竹林林冠截留量为 278.6 mm，林冠截留率占总降雨量的 32.7%，与钱金平等[16]对太行山油松林(18.9%)，刘建立等[17]对华北落叶松(25.08%)的研究结果相比较高，但仍处于中国主要森林生态系统的林冠截留率 11%～37%范围内。降雨量较小时，林冠层可以截留大部分的降雨，研究区小雨占总降雨次数的 75.68%，降雨强度≤1 mm/h 的场降雨占总降雨次数的 56.76%，小雨量、低强度的降雨事件占据优势，且毛竹林叶面积指数、郁闭度(0.89)均较高，导致其林冠截留率较高。根据林冠截留量与降雨量的回归方程以及平均降雨强度，估算出在降雨期间，毛竹饱和林冠的平均蒸发速率为 0.42 mm/h。

林冠截留过程受林分类型、林冠层特征、气象因子等多种因素的的影响，McJannet 等[18]和 Bulcock 等[19]的研究显示叶面积指数对林冠截留起着显著的作用，将林冠特征中的叶面积指数与林冠截留进行分析，研究期内，各月林冠截留总量随月平均叶面积指数的增加呈一定程度上增大的趋势，月平均林冠截留率与各月平均叶面积指数的关系，一定程度上表现为随叶面积指数的增大林冠截留率减小，林冠截留率并未随叶面积指数的增加而上升，原因在于研究区叶面积指数较大的月份，降雨量普遍较高，导致林冠截留率

低于叶面积指数较低的月份，叶面积指数在一定程度上影响林冠截留，林冠截留主要决定于降雨量[14,20]。

4 结 论

本文采用灰色关联分析法，对影响长三角地区毛竹林林冠截留量以及林冠截留率的气象因子进行了研究，各气象因子与毛竹林的林冠截留量的灰色关联度大小顺序依次为：降雨强度＞降雨量＞风速＞空气温度＞风向＞空气湿度，各气象因子与毛竹林的林冠截留率的灰色关联度大小顺序依次为：空气温度＞风向＞降雨量＞风速＞降雨强度＞空气湿度。本文研究仍有不足之处，仅凭一年的观测数据进行分析有一定的偶然性，仍需进行长期定位观测，以期得到更加完善的研究结论。

[参 考 文 献]

[1] John T I, Courtney M S, Delphis F J, et al. Effects of wind-driven rainfall on stemflow generation between codominant tree species with differing crown characteristics[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(9): 1277-1286.

[2] 段旭，王彦辉，于澎涛，等. 六盘山分水岭沟典型森林植被对大气降雨的再分配规律及其影响因子[J]. 水土保持学报，2010，24(5)：120-125.

[3] 蔡丽君，王国栋，张仕奇. 黄土高原降雨雨滴动能的分布律[J]. 水土保持通报，2003，23(4)：28-29，54.

[4] 贡力. 黄土高原降雨雨滴动能的侵蚀计算[J]. 兰州交通大学学报，2005，24(4)：43-45.

[5] Hopp L, Mcdonnell J J. Examining the role of throughfall patterns on subsurface stormflow generation[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1): 460-471.

[6] 周择福，张光灿，刘霞，等. 树干茎流研究方法及其述评[J]. 水土保持学报，2004，18(3)：137-140，145.

[7] Hofhansl F, Wanek W, Drage S, et al. Controls of hydrochemical fluxes via stemflow in tropical low land rainforests: Effects of meteorology and vegetation characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2012(452/453): 247-258.

[8] Bäse F, Helmut E, Neill C, et al. Differences in throughfall and net precipitation between soybean and transitional tropical forest in the southern Amazon, Brazil[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2012, 159: 19-28.

[9] 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.

[10] 谭学瑞，邓聚龙. 灰色关联分析：多因素统计分析新方法[J]. 统计研究，1995，12(3)：46-48.

[11] 王晓燕，毕华兴，高路博，等. 晋西黄土区刺槐人工林林冠截留模拟[J]. 中国水土保持科学，2012，10(2)：44-49.

[12] Leyton L, Reynolds E R C, Thompson F B. Rainfall interception in forest and moorland[M]// Sopper W E, Lull H W. International Symposium on Forest Interception Studies on Forest Hydrology. Toronto: Pergamon Press, 1967: 163-178.

[13] 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.

[14] 曹云，黄志刚，欧阳志云，等. 湖南省张家界马尾松林冠生态水文效应及其影响因素分析[J]. 林业科学，2006，42(12)：13-20.

[15] 邱治军，周光益，吴仲民，等. 粤北杨东山常绿阔叶次生林林冠截留特征[J]. 林业科学，2011，47(6)：157-161.

[16] 钱金平，王仁德，白洁，等. 太行山区不同人工林林冠截留降水的比较研究[J]. 水土保持通报，2012，32(4)：164-167.

[17] 刘建立，王彦辉，于澎涛，等. 六盘山叠叠沟小流域华北落叶松人工林的冠层降水再分配特征[J]. 水土保持学报，2009，23(4)：76-81.

[18] McJannet D, Vertessy R. Effects of thinning on wood production, leaf area index, transpiration and canopy interception of a plantation subject to drought[J]. Tree Physiology, 2011, 21(12/13): 1001-1008.

[19] 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]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(2): 383-392.

[20] 巩合德，王开运，杨万勤，等. 川西亚高山原始云杉林内降雨再分配研究[J]. 林业科学，2005，41(1)：198-201.