

# 青海大通白桦林冠层降雨再分配与冠层结构关系研究

黄团冲,贺康宁\*,王先棒

(北京林业大学水土保持学院,国家林业局水土保持重点实验室,北京市水土保持工程技术研究中心,  
林业生态工程教育部工程研究中心,北京 100083)

**摘要:**通过设计不同密度的12个样地,测定降雨再分配与冠层结构指标的关系以及不同降雨量下降雨再分配变化情况。结果表明,当降雨量 $<10$  mm时,穿透雨量与冠层结构特征关系并不明显,但是其空间变化明显,变异系数较大;降雨量 $>10$  mm后,叶面积指数、郁闭度均与穿透雨量呈多项式函数关系,穿透雨量随着叶面积指数、郁闭度的增大而减小,穿透雨量与冠层孔隙度呈负相关的多项式函数关系;林冠截留率随着叶面积指数和郁闭度的增大而增大,随着冠层孔隙度的增大而减小;叶面积指数、冠层孔隙度和郁闭度3个冠层结构指标之间,叶面积指数对穿透雨和林冠截留影响最大。研究期间,林外降雨总量为243.24 mm,白桦林的总穿透雨量、树干茎流量、截留量分别为185.61、2.49 mm和56.55 mm,分别占大气降雨总量的76.31%、1.02%和23.24%;穿透雨量、树干茎流量、截留量均与林外降雨量呈显著正相关关系,穿透雨率、树干茎流率随着降雨量的增大而增大,截留率随着降雨量的增大而减小并逐渐趋于稳定;降雨量 $>3.32$  mm时才开始产生树干茎流。

**关键词:**白桦;降雨再分配;冠层结构;降雨量

中图分类号:S792.153

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2018)03-0001-06

## Relationship between Rainfall Redistribution and Canop Structure of *Betula platyphylla* Canopy in Datong, Qinghai

HUANG Tuan-chong, HE Kang-ning\*, WANG Xian-bang

(School of Soil and Water Conservation Beijing Forestry University, Key Laboratory of State Forestry Administration on  
Soil and Water Conservation, Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Engineering Research  
Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to determine the relationship between rainfall redistribution and canopy structure indexes and changes of rainfall redistribution under different rainfall conditions in *Betula platyphylla* forest, 12 plots with different densities were designed. The results showed that when the rainfall was less than 10 mm, the relationship between the rainfall and canopy structure was not significant, but its spatial variation was obvious and the coefficient of variation was larger. When the rainfall was more than 10 mm, the leaf area index and canopy density had polynomial function relationship with throughfall rainfall, and throughfall decreased with the increase of leaf area index and canopy density, throughfall and canopy porosity were negatively related to polynomial function. The interception rate of canopy increased with the increase of leaf area index and canopy density, and decreased with the increase of canopy porosity. For the three canopy structure indexes (leaf area index, canopy porosity, and canopy density), leaf area index greatly affected the interception throughfall and canopy. During the study period, the total rainfall was 243.24 mm, and the to-

收稿日期:2017-08-10 修回日期:2017-11-30

基金项目:国家自然科学基金“西北高寒山区防护林体系定向调控技术研究与示范”(2015BAD07B030302)。

作者简介:黄团冲,男,在读硕士,研究方向:水土保持、林业生态工程。E-mail:htcbjfu@163.com

\*通信作者:贺康宁,男,教授,博士生导师,研究方向:水土保持、林业生态工程。E-mail:hkn@bjfu.edu.cn

tal throughfall, stemflow and interception were 185.61, 2.49, and 56.55 mm, accounting for 76.31%, 1.02% and 23.24% of the total rainfall, respectively. Throughfall, stemflow and interception were positively correlated with the forest rainfall, throughfall rate, stem flow rate increased with the increase of rainfall, the interception rate decreased with the increase of rainfall and tended to be stable.

**Key words:** *Betula platyphylla*; rainfall redistribution; canopy structure; rainfall

冠层是森林与外界接触最为活跃的界面,是森林生态系统发挥其水文生态功能的主要执行者<sup>[1-2]</sup>,大气降雨经过冠层后重新分配为穿透雨、树干茎流和冠层截留<sup>[3]</sup>,研究降雨在林冠的作用下再分配具有重要的意义。冠层通过对降雨的截留与缓冲减弱了雨滴侵蚀动能,通过遮荫减少地表蒸发,调节河川径流,维持生态系统水循环和水量平衡<sup>[4]</sup>。林冠对降水的再分配是水分输入森林的第一个环节,国内外很多学者对森林对降雨再分配进行了大量的研究<sup>[5-11]</sup>,其中对白桦林降雨再分配的研究主要集中在东部低海拔地区<sup>[12-17]</sup>,而在西北部高海拔地区研究较少,且在林冠结构特征对降雨再分配方面的影响很少深入探讨,所以本研究以青海大通宝库林场的白桦林为研究对象,在分析其林冠结构特征的基础上,对穿透雨、树干流、林冠截留进行分析与研究,为青海大通白桦林地的水量平衡及森林生态系统水文功能机理研究提供理论指导和科学依据。

## 1 研究区概况

本研究区位于青海省东部的大通县宝库林场,地处青藏高原和黄土高原过渡地带,100°28′—101°38′E,36°11′—37°19′N,总面积 3 114 hm<sup>2</sup>,年均气温 2.9℃,最暖月平均气温 16℃,最冷月平均气温 -11.7℃。最大冻土深度 114 cm,最大积雪厚度 18 cm。年降水量 556 mm,年平均蒸发量 1 290 mm,降水主要集中在 6—9 月,降雨季节分配不均,年平均相对湿度 56%。年内无霜期 47 d,地势西北高东南低,属高原大陆性气候。土壤发育脆弱,熟化程度较低,保肥性能差。海拔 2 610~4 235 m,平均森林覆盖率为 79.0%,主要乔木树种有白桦(*Betula platyphylla*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等,主要灌木种有峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、山生柳(*Salix oritrepha*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、秦岭小檗(*Berberis circumserrata*)等,主要草本物种有问荆(*Equisetum arvense*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、苔草(*Carex* sp.)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

在研究区白桦林地内选择位于阳坡,林龄近似,

具有不同密度的 12 个标准地(10 m×10 m),并调查其密度、胸径、树高、冠幅等指标(表 1)。利用冠层分析仪的鱼镜头进行定点拍照提取林冠层的冠层孔隙度、叶面积指数(LAI)、郁闭度等参数。

表 1 青海大通白桦林样地基本情况

Table 1 Basic situation of *B. platyphylla* forest plots in Qinghai Datong

样地	密度 /(棵·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 /cm	平均树高 /m	冠幅 /m
1	2 200	35.2	18.1	4.0×4.2
2	2 300	12.3	5.2	1.1×1.5
3	2 100	34.7	21.5	4.4×4.6
4	2 700	26.4	13.4	1.8×2.2
5	1 700	20.3	16.6	3.3×3.3
6	3 100	14.5	8.8	1.2×1.8
7	3 500	9.1	7.7	2.0×2.4
8	3 700	8.6	7.4	1.1×1.3
9	4 000	10.5	6.9	2.7×3.1
10	4 100	12.3	9.6	1.0×1.8
11	4 100	11.6	10.5	1.2×2.0
12	4 800	13.6	9.8	2.0×2.2
平均	3 191	17.4	11.3	2.5×2.9

### 2.2 林外降雨量的测定

在标准地旁边的空地上布置 2 个直径为 200 mm 的标准雨量筒,离地面约 70 cm,雨量筒上缘高于附近地被植物,实时观测研究区的林外降雨量。

### 2.3 林内穿透雨的测定与计算

在样地内每隔 2 m 沿等高线平行布设 4 个雨量槽(100 cm×20 cm×25 cm),雨量槽用木桩固定在地面上,槽身稍微倾斜,下端用塑料管连接一加盖塑料桶以收集雨水,每场降雨后收集的雨水倒入标准雨量筒中即可得穿透雨深,样方内 4 个观测点的穿透雨深平均值作为该样方穿透雨深。

### 2.4 树干径流的观测与计算

在不同样地内分别选取树干径级具有代表性的标准木 5 株,在标准木树干离地约 1.3 m 处用聚乙烯橡胶管呈 30°角缠绕,用钉子固定,橡胶管延中缝剪开做成集水槽,用密封胶将树干与橡胶管之间缝隙密封,将橡胶管下端伸入加盖塑料桶中,每次降雨后立即测量桶中雨水体积。用各径阶的树干茎流体积与相应各径阶株数相乘之和除以样地面积即可得到林分的树干径流量。

### 2.5 林冠截留量的计算

根据水量平衡的原理,通过观测的林外降雨量、穿透降雨量和树干茎流量计算求出林冠截留量:

$$I = P - (T + S) \quad (1)$$

式中, $P$  为林外降雨量, $T$  为穿透降雨量, $S$  为树干茎流量, $I$  为林冠截留量。

### 2.6 叶面积指数、郁闭度和冠层孔隙度提取

利用 WinScanopy 2006 软件配备的冠层分析仪在多云或者晴朗天气的 7:00—9:00 对冠层进行拍照,避免直射光照射产生的光斑,相机支架约离地面 1.3 m,去除曝光过度的照片再进行分析,获得林冠层叶面积指数和冠层孔隙度,冠层郁闭度 = (1 - 冠层开阔度) × 100%。观测期提取冠层孔隙度、叶面积指数和郁闭度(表 2)。

表 2 各样地叶面积指数、郁闭度、冠层孔隙度

Table 2 The leaf area index, canopy density and canopy porosity of plots

样地	叶面积指数 LAI	郁闭度	冠层孔隙度/%
1	2.67	0.80	25.33
2	2.68	0.85	24.22
3	2.63	0.79	23.79
4	2.84	0.86	23.52
5	2.46	0.77	26.89
6	3.05	0.88	19.61
7	3.2	0.87	22.45
8	3.34	0.90	18.54
9	3.46	0.90	14.88
10	3.54	0.92	19.51
11	3.51	0.91	17.64
12	3.91	0.94	15.45
平均	3.11	0.87	20.99

## 3 结果与分析

### 3.1 白桦林外降雨特征

观测时间从 2016 年 5 月 15 日—8 月 18 日,共记录 25 场降雨(图 1),总降雨量为 243.24 mm,平均每次降雨量为 9.7 mm,其中小雨 15 次(日降雨量 ≤ 10 mm),中雨 8 次(日降雨量 10.0~24.9 mm),大雨 1 次(日降雨量 25.0~49.9 mm),暴雨 1 次(日降雨量 50.0~99.9 mm),各占总降雨次数的 60%、32%、4%、4%,降雨主要集中在 7—8 月,7 月份最多。

### 3.2 白桦林内穿透雨特征

研究期间观测到的林内穿透雨总量为 185.61 mm,占整个研究期间降雨总量的 76.31%,穿透雨量与林外降雨有着较好的幂函数关系(图 2),拟合方程为  $y = 0.3704x^{1.2484}$ ,  $R^2 = 0.9952$ ,穿透雨随

着林外降雨的增大而增大。而穿透雨率随着林外降雨量的增大先增大后趋于平稳,降雨量与穿透雨率有着很好的对数关系,其方程式为  $y = 14.359\ln(x) + 34.898$ ,  $R^2 = 0.8828$ 。穿透雨率在降雨量较小时误差较大,为了研究白桦林内穿透雨的空间异质性,采用变异系数( $C$ )来衡量不同降雨特征条件下穿透雨的变异程度:

$$C = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $s$  为标准差, $\bar{x}$  为平均值。

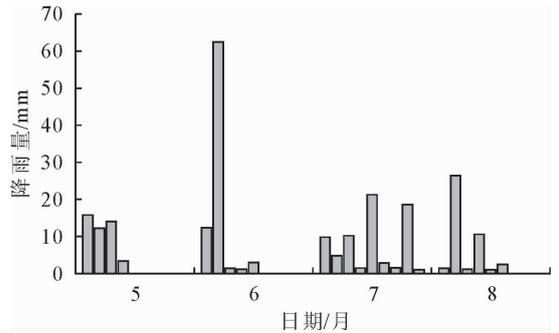


图 1 研究区林外降雨季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of forest rainfall outside the study area

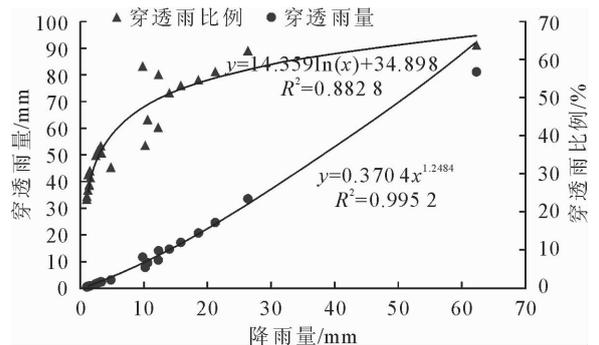


图 2 穿透雨量、穿透雨比例与降雨量关系

Fig. 2 The relationship between rainfall and throughfall and throughfall ratio

由图 3 可以看出,穿透雨变异系数随着降雨量的增大先急剧减小后趋于平稳,当降雨量为 1 mm 时,变异系数达 59%,此时各样地观测点穿透雨空间变化最大,由此推测,当降雨量更小时,其变异系数将超过 59%;当降雨量达到 10 mm 时,变异系数逐渐趋于稳定,在 10% 上下波动。这是由于在降雨刚开始时,由于雨量较小,降雨小部分直接穿过林窗,大部分被冠层所截留,采用简易雨量筒观测会产生较大误差,随着降雨的缓缓增大,冠层逐渐被雨滴所润湿,透过林冠层的雨滴越来越多,穿透雨率随之增大,待冠层达到饱和时,穿透雨率达到平稳,且此时穿透雨量占大气降雨总量比例较大。

为了更好地研究穿透雨与冠层结构特征关系,图 4 显示了林内穿透雨量与叶面积指数、冠层孔隙

度和郁闭度的关系,可以看出,在不同林外降雨量条件下,穿透雨量随叶面积指数的变化趋势也有不同,当降雨在 0~10 mm 时,穿透雨量与叶面积指数、冠层孔隙度、郁闭度关系都不明显,当降雨 > 10 mm

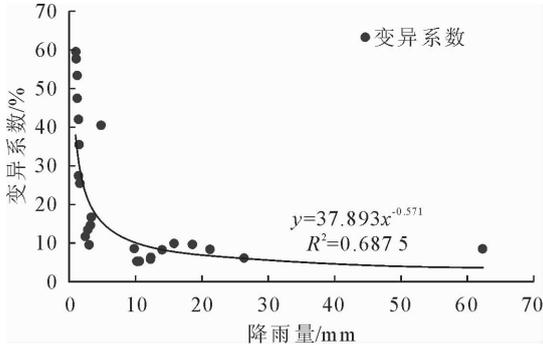


图 3 穿透雨变异系数与降雨量关系

Fig. 3 Relationship between rainfall variation coefficient and rainfall

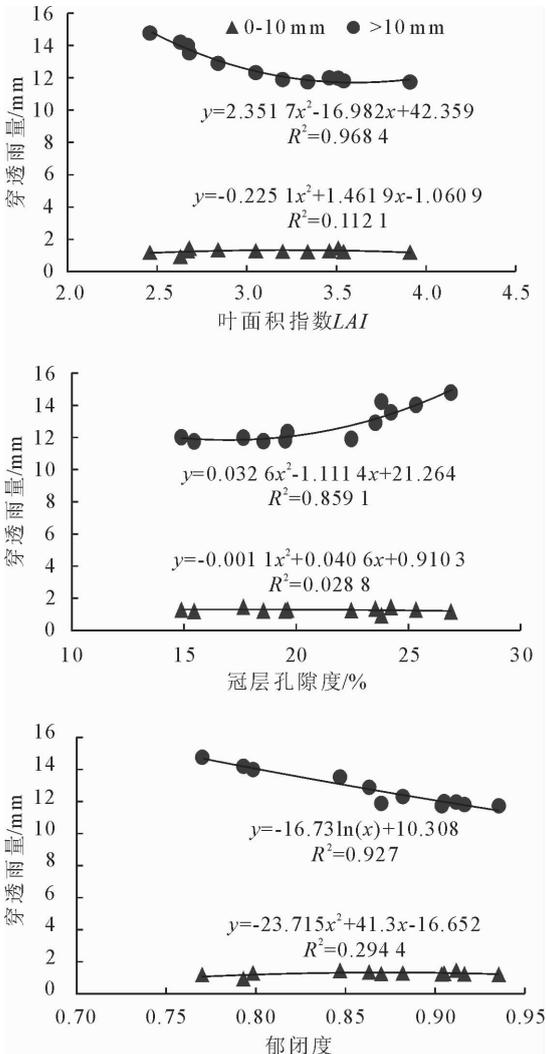


图 4 林内穿透雨量与叶面积指数、冠层孔隙度和郁闭度的关系

Fig. 4 Relationship between throughfall and leaf area index, canopy porosity and canopy density in forest

时,穿透雨量随着叶面积指数、郁闭度的增大而缓慢减小,随着冠层孔隙度的增大而有所增大。雨量较小时,降雨大部分被冠层所截留,冠层结构特征对穿透雨影响较小,降雨增大后,随着叶面积指数和郁闭度的增大,单位林地面积上叶片、枝干越多,对降雨的拦挡越大,从而导致穿透雨越小。相反冠层孔隙度越大,对降雨遮挡物越少,直接穿过冠层的降雨越多。

冠层孔隙度、叶面积系数、郁闭度与穿透雨量的回归方程:

$$y = 0.0326x_1 - 1.1114x_1 + 21.264, R^2 = 0.8591$$

$$y = 2.3517x_2 - 16.982x_2 + 42.359, R^2 = 0.9684$$

$$y = -16.73\ln(x_3) + 10.308, R^2 = 0.9270$$

式中,  $x_1$  代表冠层孔隙度,  $x_2$  代表叶面积指数,  $x_3$  代表郁闭度,  $y$  代表穿透雨量。为研究不同的叶面积指数、郁闭度和冠层孔隙度共同对穿透雨量的影响,本研究采用多元线性回归的方法,建立穿透雨量与叶面积指数、郁闭度和冠层孔隙度的回归方程,运用 SPSS 软件、线性回归得到不同结构指数与穿透雨量的关系为:

$$y = 31.722 - 0.151x_1 - 1.906x_2 - 13.06x_3$$

将上述模型系数标准化为:

$$y = -0.528x_1 - 0.771x_2 - 0.627x_3$$

由标准化偏回归系数可见,叶面积指数对穿透雨量影响最大。

### 3.3 白桦林树干茎流特征

干流主要由降雨落在叶面或者小枝上汇流至主干流到林地<sup>[18]</sup>,树干茎流虽然在冠层水分再分配中占据较小比例,但对于植被生长及养分循环具有重要作用<sup>[19]</sup>。研究期间观测到的树干茎流总量为 2.49 mm,占降雨总量的 1.02%,单次降雨树干径流量变化范围为 0.00~0.85 mm,由图 5 可以看出树干茎流量与林外降雨量有着极显著相关关系,树干茎流量随着林外降雨量的增大而增大,拟合关系式为  $y = 0.0141x - 0.0376, R^2 = 0.9453$ ,当降雨量较小时,树干茎流增加缓慢,当降雨量 > 18 mm 时开始快速增加,观测到产生树干茎流的降雨有 13 场,且只有降雨量 > 3.32 mm 才开始产生树干径流。树干茎流率与林外降雨量有着显著性的对数函数关系,其方程式为  $y = 0.347\ln(x) - 0.1117, R^2 = 0.8706$ ,树干茎流率随着降雨量的增大而增大。

### 3.4 白桦林冠截留特征

通常采用林冠截留率(林冠截留量与降雨量的

比值)表示(图6),观测期内林木冠层截留总量为56.55 mm,占同期降雨总量的23.25%,单次降雨林冠截留率7.51%~66.61%,截留量范围为0.66~4.68 mm。由图6可知,林冠截留率随着降雨量的增大先急剧减小后逐渐趋于稳定,降雨量<14 mm时,林冠截留率最大可达66.61%,当降雨量>14 mm后林冠截留率变趋于稳定。林冠截留量则随着降雨量的增加而增加,且增长速度逐渐减缓。

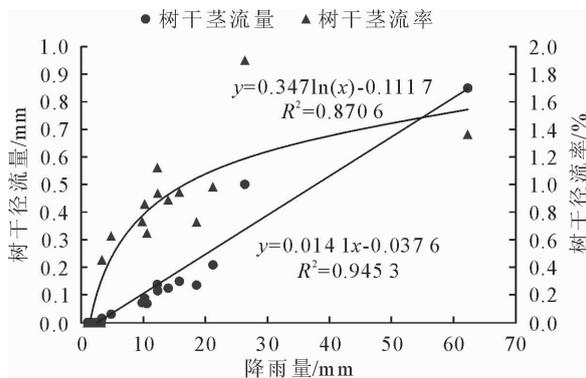


图5 树干茎流量、树干茎流率与降雨量关系  
Fig. 5 Relationship between stem flow, trunk stem flow rate and rainfall

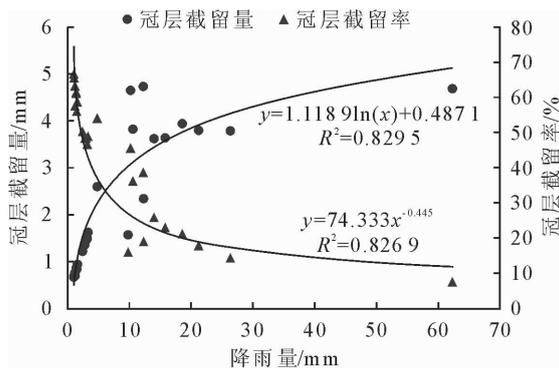


图6 冠层截留量、冠层截留率与降雨量关系  
Fig. 6 The relationship between canopy interception, canopy interception and rainfall

林冠截留除了降雨量对其有影响外,冠层结构指标也有着重要影响,由图7可以看出,叶面积指数、冠层孔隙度、郁闭度都与林冠截留有着较好的线性关系,林冠截留率随着叶面积指数和郁闭度的增大而增大,郁闭度和叶面积指数越大,单位林地面积上树木枝、叶、干吸收和拦截了更多的降雨,增加了林冠截留量。冠层孔隙度越大,更多的降雨直接穿过冠层,导致林冠截留得越少。

林冠特征与冠层截留率的回归方程:

$$y = -0.1252x_1^2 + 3.8533x_1 + 3.449, R^2 = 0.5974$$

$$y = -6.8201x_2^2 + 56.435x_2 - 80.792, R^2 = 0.7898$$

$$y = 114.82x_3 - 72.029, R^2 = 0.7662$$

式中,y代表冠层截留率。

为研究不同的叶面积指数、郁闭度和冠层孔隙度共同对林冠截留率的影响,本研究采用多元线性回归的方法,建立林冠截留率与叶面积指数、郁闭度和冠层孔隙度的回归方程,运用SPSS19.0软件,线性回归得到不同结构指数与林冠截留率的关系为:

$$y = -102.612 + 0.975x_1 + 12.052x_2 + 83.276x_3$$

将上述模型系数标准化为:

$$y = 0.541x_1 + 0.774x_2 + 0.635x_3$$

由标准化偏回归系数可见,叶面积指数对冠层截留率影响最大。

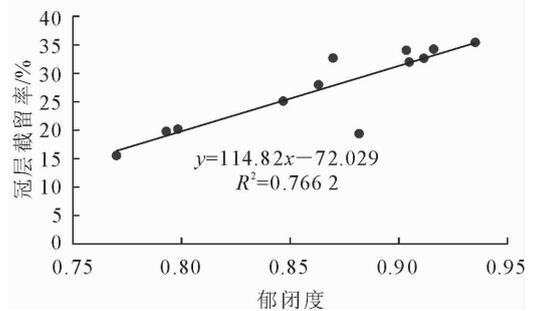
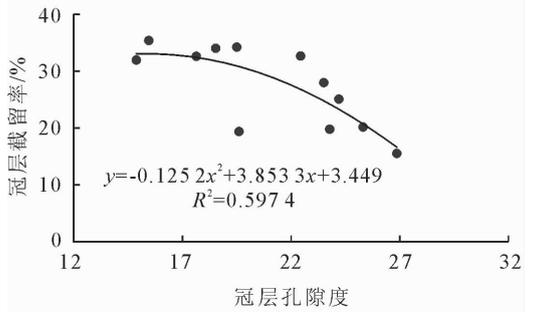
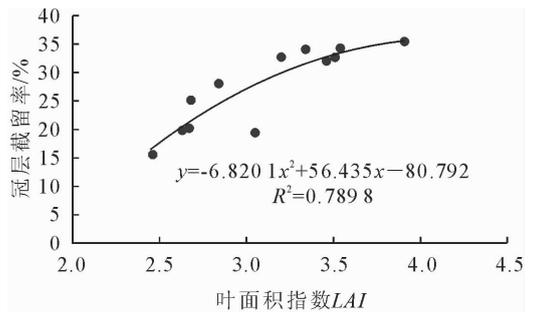


图7 林冠截留率与叶面积指数、冠层孔隙度、郁闭度关系  
Fig. 7 The relationship between leaf interception rate and leaf area index, canopy porosity and canopy closure

### 3.5 白桦林对降雨的再分配

研究期间,25场降雨的总穿透雨量、树干茎流量、截留量分别为166.22、2.06、74.97 mm,从白桦林对降雨的再分配可以看出(表3),随着雨量级的不同,穿透雨、树干茎流、林冠截留也发生着较大的变化,雨量级较小时,干流量、干流率、穿透雨量、穿透雨率均为最小值,但截留率为最大值,雨量级较大时,干流量、干流率、穿透雨量、穿透雨率均为最大值,但截留率为最小值。

表 3 白桦林降雨再分配

Table 3 Rainfall redistribution table of *B. platyphylla* forest

mm, %

雨量级	降雨次数	总降雨量 /mm	穿透雨		树干茎流		林冠截留	
			穿透雨量	比率	树干茎流量	比率	截留量	截留率
0~3	11	18.56	8.25	42.11	0	0	10.31	57.89
3~10	4	21.12	13.73	58.17	0.12	0.45	7.27	41.38
10~17	6	75.13	51.67	67.76	0.68	0.90	22.78	31.35
17~24	2	39.19	31.73	79.64	0.34	0.85	7.73	19.53
>24	2	88.65	80.24	90.09	1.35	1.63	8.46	10.94

## 4 结论与讨论

分析发现,研究期间穿透雨总量为 185.61 mm,占降雨总量的 76.31%,且穿透雨量随着降雨量的增大而增大,穿透雨量与林冠结构特征的关系随着降雨量大小而有所不同,雨量较小时,由于观测设备精确度较小,因此穿透雨量随冠层结构特征的变化不明显,随着降雨量的增大,发现穿透雨量随着叶面积指数和郁闭度的增大而减小,随着冠层孔隙度的增大而增大。与其他地区对白桦林的研究相比,田野宏<sup>[14]</sup>等发现大兴安岭北部白桦次生林穿透雨率为 84.27%,段旭<sup>[16]</sup>等发现六盘山白桦林穿透雨率为 85.91%,巩合德<sup>[4]</sup>等在川西亚高山研究白桦林穿透雨率为 80.9%,本研究的穿透雨率要小于这几者,其原因是因为穿透雨除了受林外降雨量的影响外还受冠层结构特征的影响,本研究区林分密度要远大于前两者,因此其叶面积指数和郁闭度等冠层结构指数也相应更加大,导致穿透雨率的减小。

整个研究期间,树干茎流总量为 2.49 mm,占降雨总量的 1.02%,树干茎流率要高于巩合德<sup>[4]</sup>等(0.3%)、段旭<sup>[16]</sup>等(0.33%)研究结果,低于田野宏<sup>[14]</sup>等、蔡体久<sup>[17]</sup>等的研究结果,降雨量 > 3.32 mm 时才开始产生干流。树干茎流量和树干茎流率都随着降雨量的增大而增大,但径流量先缓慢增加后急剧增加,而径流率增速渐渐减小。树干茎流量占林外降雨量比例较小,但在增加林分养分促进林木生长方面起着重要的作用。树干茎流除了受降雨量影响外,还受降雨强度、枝下高、冠层厚度、枝角、树皮粗糙度等因素的影响,这在以后的研究中需要进一步改善。

研究期间林冠截留总量和截留率分别为 56.55 mm、23.24%,降雨量对林冠截留有较大影响<sup>[20]</sup>,方程式为  $y = 1.1189 \ln(x) + 0.4871$ ,  $R^2 = 0.8295$ ,随降雨量的增加先增加后趋于稳定,截留率与降雨量呈幂函数相关关系,回归方程为  $y = 74.333x - 0.445$ ,  $R^2 = 0.8269$ ,随降雨的增加逐渐下降最后稳定趋于最低值。林冠截留与冠层结构有着密切的关

系,通过回归发现截留率随着叶面积指数和郁闭度的增加而增大,随着冠层孔隙度的增大而减小,进一步通过回归发现叶面积指数对林冠截留影响最大,本研究得出的林冠截留率要小于段旭<sup>[16]</sup>等、巩合德<sup>[4]</sup>等、田野宏<sup>[14]</sup>等、蔡体久<sup>[17]</sup>等国内不同地区所得出的结果,这是由于本次试验样地密度较大,所测得叶面积指数较大,而叶面积指数与林冠截留率呈负相关关系。A. I. J. M. V. Dijk<sup>[21]</sup>等发现,林冠截留和穿透雨均与叶面积指数有着显著的关系,这与本研究结果一致,在本研究冠层孔隙度、叶面积指数、郁闭度与穿透雨量和林冠截留率的关系时发现叶面积指数对两者的影响最大。

## 参考文献:

- [1] 田凤霞,赵传燕,冯兆东,等. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 62-72.  
TIAN F X, ZHAO C Y, FENG Z D, et al. Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 62-72. (in Chinese)
- [2] 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(Supp. 1): 39-42.  
JIN B W, WANG J Y, CHANG Z Q, et al. A study on hydrologic function of canopy of *Picea Crassifolia* in Qilian Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2001, 16(Supp. 1): 39-42. (in Chinese)
- [3] 宝虎,刘殿国,赵鹏武,等. 大兴安岭南段白桦林降雨再分配特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 82-87.  
BAO H, LIU D G, ZHAO P W, et al. Research on rainfall redistribution of *Betula platyphylla* forests in south of Greater Xing'an Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(2): 82-87. (in Chinese)
- [4] 巩合德,王开运,杨万勤,等. 川西亚高山白桦林穿透雨和茎流特征观测研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 17-20.  
GONG H D, WANG K Y, YANG W Q, et al. Throughfall and stemflow in a *Betula platyphylla* forest at the subalpine of western Sichuan[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(4): 17-20. (in Chinese)
- [5] 甘健民,赵恒康,薛敬意. 云南哀牢山常绿阔叶林林冠对降雨的再分配[J]. 林业科技, 1999, 24(4): 18-20.

- cies diversity an biomass of artificial *Bobinia pseudoacacia* forests in Yanan suburb[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 1-7. (in Chinese)
- [14] 王琳琳, 黄土丘陵区人工柠条林群落特征及土壤有机碳动态[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2010.
- [15] 徐学华, 张文辉, 张慧, 等. 黄土丘陵区狼牙刺群落恢复过程中物种多样性动态研究[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(3): 1-5. XU X H, ZHANG W H, ZHANG H, *et al.* Study on the species diversity dynamics of *Sophora davidii* community in Loess Hilly region[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2006, 29(3): 1-5. (in Chinese)
- [16] 张晶晶, 王蕾, 许冬梅. 荒漠草原自然恢复中植物群落组成及物种多样性[J]. 草业科学, 2011, 28(6): 1091-1094. ZHANG J J, WANG L, XU D M. Composition and plant species diversity of plant community in the process of natural restoration of desert steppe[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(6): 1091-1094. (in Chinese)
- [17] 王国梁, 刘国彬, 刘芳, 等. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2550-2557. WANG G L, LIU G B, LIU F, *et al.* Changes in composition and structure of plant communities during the course of restoration at loess gully region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2550-2557. (in Chinese)
- [18] 程瑞梅, 肖文发, 李建文. 长江三峡库区草丛群落多样性的研究[J]. 山地学报, 2005, 23(4): 502-506. CHENG R M, XIAO W F, LI J W. The study of biodiversity on Hassocks in Three Gorges Reservoir area in China[J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(4): 502-506. (in Chinese)
- [19] 郭连金, 张文辉, 刘国彬. 黄土丘陵区沙棘人工林发育过程中物种多样性及种间关联变化[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 9-15. GUO L J, ZHANG W H, LIU G B. Species diversity and interspecific association in development sequence of *Hippophae rhamnoides* plantations in loess hilly region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(1): 9-15. (in Chinese)
- [20] 张文辉, 徐学华, 李登武, 等. 黄土高原丘陵沟壑区狼牙刺群落恢复过程中的种间联结性研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(6): 1018-1023. ZHANG W H, XU X H, LI D W, *et al.* Study on interspecific association in course of *Sophora davidii* communities recovering in Loess Plateau hilly region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(6): 1018-1023. (in Chinese)
- (上接第 6 页)
- [6] 张学培, 郭冬青, 王本楠. 林冠截留理论模型的应用[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(2): 30-34.
- [7] 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. LIU J G, WAN G L, ZHANG X P, *et al.* Semi-theoretical model of rainfall interception of forest canopy[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(2): 2-5. (in Chinese)
- [8] 郑远长, 裴铁. 林冠分配降雨过程模拟与模型 II. 模型扩展与参数确定[J]. 林业科学, 1996, 32(2): 97-102.
- [9] 裴铁, 郑远长. 林冠分配降雨过程模拟与模型 I. 常雨强下穿透降雨、树干径流和林冠截留模型[J]. 林业科学, 1996, 32(1): 1-10.
- [10] 温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析[J]. 林业科学, 1995, 31(4): 289-298.
- [11] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述 (I) [J]. 西北林学院学报, 2000, 15(3): 1-7.
- [12] 刘茜, 满秀玲, 田野宏. 白桦次生林降雨水化学及养分输入特征[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(8): 83-89. LIU Q, MAN X L, TIAN Y H. Hydro-chemical and nutrient importing characteristics of precipitation in secondary *Betula platyphylla* forests in northern Great Xing'an Mountains, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(8): 83-89. (in Chinese)
- [13] 宝虎. 大兴安岭南段典型天然林林冠截留特征研究及模拟[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [14] 田野宏, 满秀玲, 刘茜, 等. 大兴安岭北部白桦次生林降雨再分配特征研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 109-113. TIAN Y H, MAN X L, LIU Q, *et al.* Research on rainfall redistribution of *Betula platyphylla* secondary forests in north of Greater Xing'an Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 109-113. (in Chinese)
- [15] 田野宏. 大兴安岭白桦次生林降雨再分配及土壤水源涵养功能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [16] 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. DUAN X, WANG Y H, YU P T, *et al.* Rainfall redistribution and its influence factors of typical forest vegetation in the ditch watershed, Liupan Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 120-125. (in Chinese)
- [17] 蔡铁久, 朱道光, 盛后财. 原始红松林和次生白桦林降雨截留分配效应研究[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(6): 61-65. CAI T J, ZHU D G, SHENG H C. Rainfall redistribution in virgin *Pinus koaiensis* forest and secondary *Betula platyphylla* forest in northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(6): 61-65. (in Chinese)
- [18] 裴铁, 刘家冈, 韩绍文, 等. 树干径流模型[J]. 应用生态学报, 1990, 1(4): 294-300. PEI T P, LIU J G, HAN S W, *et al.* Model of stemflow[J]. Journal of Applied Ecology, 1990, 1(4): 294-300. (in Chinese)
- [19] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 等. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1932-1939.
- [20] 鲜靖苹, 张家洋, 胡海波. 森林冠层水文研究进展[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 96-104. XIAN J P, ZHANG J Y, HU H B. Forest canopy hydrology: a review[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 96-104. (in Chinese)
- [21] DIJK A I J M V, BRUIJNZEEL L A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description[J]. Journal of Hydrology, 2001, 247(3/4): 230-238.