祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素

万艳芳[1]，刘贤德[1,2]，王顺利[2]，于澎涛[3]，李 广[1]，敬文茂[2]，李晓青[1]

(1. 甘肃农业大学林学院，兰州 730070；2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院，甘肃 张掖 734000；
3. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所，北京 100091)

摘要：以祁连山排露沟小流域青海云杉林为研究对象，2015 年 5—9 月观测了 34 场降雨的林外降雨量、穿透雨量和树干茎流量，并同步观测了相关的林外气象因子，分析了青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素。结果表明：(1)青海云杉林的总穿透雨量、树干茎流量和截留量分别为 275.9，1.8，90.0 mm，分别占总降雨量的 75.04%，0.48%和 24.48%，并在不同降雨量等级之间存在差异。(2)冠层降雨再分配各组成要素(穿透雨、树干茎流、林冠截留)与降雨量、降雨历时、10 min 最大雨强、空气相对湿度呈极显著的相关性。随着降雨量和降雨历时的增大，穿透雨量和树干茎流量均不断增大，而穿透雨率、树干茎流率和截留量(率)均逐渐趋于稳定。(3)青海云杉林内产生穿透雨和树干茎流的临界降雨量分别为 0.8 mm 和 9.6 mm。因此，气象因素是影响冠层降雨再分配的重要因素之一。

关键词：降雨再分配；气象因素；青海云杉林；祁连山

中图分类号：S715.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2016)05-0224-06

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.037

Rainfall Canopy Partitioning and Its Influencing Factors of *Picea crassifolia* Forest in the Qianlian Mountains

WAN Yanfang[1], LIU Xiande[1,2], WANG Shunli[2], YU Pengtao[3], LI Guang[1], JING Wenmao[2], LI Xiaoqing[1]

(1. *Forestry of Gansu Agriculture University, Lanzhou* 730070;
2. *Academy of Water Resources Conservation Forests of Qilian Mountains, Zhangye, Gansu* 734000;
3. *Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091)

Abstract: Rainfall was partitioned into three parts through the vegetable canopy: Throughfall, stemflow and interception. This process played a determining role in water balance for forest stands and in regulating processes of this mountainous region. In the present study, an experiment was carried out in the Pailugou watershed in the Qilian mountains, in the arid region of northwest China. In a 72-year-old *Picea crassifolia* forest stand, throughfall, stemflow and canopy interception of 34 rain events were observed from May 1 to September 31, 2015. Further more, the related meteorological factors, including air temperature (T), air relative humidity (R_h) and precipitation (P) were simultaneously monitored by an automatic meteorological station in the outside forest. Then, we analyzed the characteristics of rainfall canopy partitioning and their influence factors. The results showed that: (1)During the total observation period, the total throughfall, stemflow and interception of *Picea crassifolia* forest were 275.9, 1.8, 90.0 mm, and accounted for 75.04%, 0.48% and 24.48% of the total atmospheric precipitation, respectively. Meanwhile, their ratios varied significantly under different rainfall grades. (2)The three parts of rainfall canopy partitioning were significantly correlated with rainfall, rainfall duration, maximum rainfall intensity in 10 minutes and relative air humidity. With the increase of rainfall and rainfall duration, throughfall and stemflow would constantly increase and their ratios would become more and more stable. (3)The critical rainfall amounts for the occurrence of throughfall and stemflow were 0.8 mm and 9.6 mm respectively. Therefore, we concluded that meteorological factors were the important factors of rainfall canopy partitioning.

Keywords: rainfall partitioning; meteorological factors; *Picea crassifolia* forest; Qilian mountains

收稿日期：2016-04-26
资助项目：国家自然科学基金项目(31360201，41461004，91225302，91425301)；甘肃省基础研究创新群体(145RJIG337)
第一作者：万艳芳(1993—)，女，硕士研究生，主要从事森林生态和水文研究。E-mail：wanyf1993@163.com
通信作者：刘贤德(1963—)，男，研究员，主要从事森林生态和湿地生态等方面的研究。E-mail：liuxiande666@163.com

森林对降水的再分配功能是森林生态系统重要的水文生态功能之一[1]。大气降水经过林冠后,被分配为林冠截留、穿透雨和树干茎流 3 个部分[2-3],这 3 部分作为土壤—植被—大气水分传输过程中的重要环节,其变化特征会影响林下土壤水分的空间分布、根系分布、以及养分循环等[4-6]。所以,林冠对降水的再分配过程是生态水文学的重要研究内容之一。

青海云杉(*Picea crassifolia*)是祁连山区的主要建群种,其面积为 10.79 万 hm^2,占水源涵养林总面积的 24.74%,占乔木林总面积的 75.72%[7],对区域涵养水源、净化水质、保持水土等具有重要的作用。目前,关于青海云杉林的降雨再分配已有较多研究,且发现不同区域、不同叶面积指数、不同郁闭度以及不同降雨量下的林冠截留率差异较大[7-11]。而针对同一研究区内,气象因子对降雨再分配特征影响的系统研究较少。因此,本文以祁连山排露沟小流域青海云杉林为研究对象,分析林冠降雨再分配特征以及与气象因素的关系,为进一步系统研究青海云杉林水量平衡提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于祁连山排露沟小流域(38°33′58.7″N,100°17′18.0″E,海拔范围 2 600～3 800 m),属于温带气候,年均气温 0.5 ℃,年均降水量 435.5 mm,且集中在 5—9 月,年均蒸发量 1 051.7 mm,年日照时数 1 892.6 h,年均相对湿度 60%。

在海拔 2 700 m 处,主要是以青海云杉(*Picea crassifolia*)林为主的寒温性针叶林,呈斑块状分布在阴坡、半阴坡,阳坡以草地为主。本研究选取了一块大小为 20 m×20 m 的青海云杉林样地,其海拔 2 762 m,坡向 30°,位于坡面的中下部,平均坡度为 27°;该林分密度为 1 725 株/hm^2,林龄 72 a,郁闭度 0.68,平均树高(10.1±2.7) m,平均胸径(14.1±5.5) cm,平均冠厚(5.6±2.6) m,平均冠幅(3.6±3.3) m。林下灌木层主要由金露梅(*Dasiphora fruticosa*)和鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)组成,盖度在 3%左右;草本层主要有披针苔草(*Koeleria crisrata*)、薛生马先蒿(*Pedicularis spp.*)、棘豆(*Oxytropis kansuensis*)等,盖度在 35%左右;苔藓层平均厚度 9.2 cm,盖度在 30%左右。试验区土壤为森林灰褐土,平均厚度 0.7 m。

1.2　研究方法

1.2.1　*林外降雨量测定*　在样地临近的林外空旷地布设 1 个口径为 20 cm 的标准雨量筒,用于收集林外降雨量。同时,在样地旁边的自动气象站内布置了一个自记雨量计,记录每次降雨事件的降雨量、降雨历时和降雨强度。

1.2.2　*穿透雨测定*　在样地内采用网格法机械布设 6 个承雨槽(100 cm×20 cm×20 cm),用于收集穿透雨。每次降雨结束后,及时测定承雨槽中的集水量,然后将承雨槽的集水量通过公式转换,变换为雨量深(mm)。

1.2.3　*树干茎流测定*　根据样地内青海云杉林的径级分布,按每隔 4 cm 为一径级,各选 1～3 株样树测定树干茎流,共选取 10 株样树。将聚乙烯塑料管剖开做槽,然后用钉子及玻璃胶将其固定在树干基部 50～140 cm 处,并将其导入容量为 10 L 的塑料桶,用于收集树干茎流。

树干茎流量计算公式为:

$$S=\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i\times M_i}{A_s\times 1000} \tag{1}$$

式中:n 为树干径级数($n=7$);C_i 为径级 i 的树干茎流体积(ml);M_i 为径级为 i 的树木株数;A_s 为样地面积(400 m^2)。

1.2.4　*林冠截留测定*　根据水量平衡原理,得到林冠截留量:

$$I=P-(T+S) \tag{2}$$

式中:P 为林外降雨量(mm);T 为穿透雨量(mm);S 为树干茎流量(mm)。

1.2.5　*气象因子观测*　用安装在试验样地附近的 CR3000 自动气象站(美国 Campbell 公司生产)对气象因子进行观测,观测指标有空气温度 T(℃),空气相对湿度 R_h(%)和风速 W_s(m/s)等,每 10 min 自动记录 1 次。

1.3　数据处理

利用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 对数据进行统计分析和作图。

2　结果与分析

2.1　降雨特征

试验期间(2015 年 5—9 月)共测得 34 场降雨,总降雨量为 367.7 mm,次降雨量的最大值为 48.1 mm,最小值为 0.9 mm,二者相差 53.4 倍。从雨量分配来看,降雨量≤5,5～10,10～15,15～20,20～30,>30 mm 6 个雨量等级的降雨场次分别为 16,6,5,1,3,3 场,累计降雨量分别为 42.3,42.6,61.7,16.8,77.5,126.8 mm,分别占总降雨量的 11.50%,11.58%,16.80%,4.57%,21.07%,34.48%。因此,研究区主要以≤15 mm 的降雨事件为主,出现了 27 场,占总降雨场次的 79.4%;>15 mm 降雨事件发生频率较小,占总降雨场次的 20.6%,但降雨量占总降雨量的 60.1%,对总降雨量影响较大。

从降雨强度来看,次降雨量的最大雨强为 3.29 mm/h,最小雨强为 0.60 mm/h,二者相差 5.48 倍。降雨强度≤1,1～2,2～3,>3 mm/h 的降雨场次分别为 10,16,6,2 场、累计降雨量分别为 30.2,245.0,

55.0,35.0 mm。因此,研究区主要以≤3 mm/h的降雨事件为主。

2.2 青海云杉林对降雨再分配

试验期间,34场降雨的总穿透雨量、树干茎流量和林冠截留量分别为275.9 mm,1.8 mm和90.0 mm,分别占总降雨量的75.04%,0.48%和24.48%。其中,穿透雨量介于0.21～42.40 mm,平均值为(8.11±11.34) mm,占同期降雨量的比例介于12.13%～90.80%,平均值为(53.86±24.70)%;树干茎流量介于0～0.42 mm,平均值为(0.05±0.11) mm,占同期降雨量的比例介于0.00%～0.88%,平均值为(0.17±0.30)%;林冠截留量介于0.69～5.75 mm,平均值为(2.65±1.22) mm,占同期降雨量的比例介于8.42%～87.87%,平均值为(45.96±24.91)%(表1)。

表1 青海云杉林冠层降雨再分配组成要素特征

降雨场次	穿透雨		树干茎流		林冠截留	
	雨量/mm	比率/%	雨量/mm	比率/%	雨量/mm	比率/%
最小值	0.21	12.13	0.00	0.00	0.69	8.42
最大值	42.40	90.80	0.42	0.88	5.75	87.87
平均值	8.11	53.86	0.05	0.17	2.65	45.96
标准差	11.34	24.70	0.11	0.30	1.22	24.91
变异系数	1.40	0.46	2.20	1.76	0.46	0.54

不同雨量级下,青海云杉林对降雨再分配的比例并不相同(表2)。随着雨量级的增大,穿透雨量和树干茎流量均不断增大,穿透雨率和树干茎流率呈增大的趋势,而截留率则出现减小的趋势。其中,在降雨场次最多的≤5 mm的雨量级中,穿透雨率(32.2%)、树干茎流量(0.002 mm)和茎流率(0.000%)都是最小,但截留量(28.7 mm)和截留率(67.8%)都是最大;在降雨量最大的>30 mm的雨量级中,穿透雨量(113.0 mm)、穿透雨率(89.1%)、树干茎流量(1.056 mm)和茎流率(0.833%)都是最大,但截留率达到最小值,为10.0%。

表2 不同雨量级降雨在青海云杉林冠层再分配

雨量级/mm	降雨量/mm	降雨场次	穿透雨		树干茎流		林冠截留	
			雨量/mm	比率/%	雨量/mm	比率/%	雨量/mm	比率/%
$P\leqslant5$	42.3	16	13.6	32.2	0.002	0.000	28.7	67.8
$5<P\leqslant10$	42.6	6	27.1	63.6	0.002	0.000	15.5	36.4
$10<P\leqslant15$	61.7	5	46.0	74.5	0.127	0.206	15.6	25.3
$15<P\leqslant20$	16.8	1	12.1	72.0	0.091	0.641	4.6	27.4
$20<P\leqslant30$	77.5	3	64.1	82.7	0.497	0.637	12.9	16.6
$P>30$	126.8	3	113.0	89.1	1.056	0.833	12.7	10.0

2.3 气象因子对降雨再分配的影响

对气象因子和降雨再分配各组成要素进行相关性分析(表3)。穿透雨量(率)、树干茎流量(率)和截留量与降雨量、降雨历时、降雨持续时间、降雨强度(包括平均降雨强度和10 min最大雨强)、空气相对湿度均呈正相关,与空气温度和风速均呈负相关,而截留率与空气温度和风速呈正相关,与其它气象因素呈负相关。其中,降雨量和降雨历时对降雨再分配各组成要素的影响最为显著,即相对系数R^2较大;空气相对湿度的影响较为显著;降雨强度对树干茎流的影响不显著,而风速对其影响显著;降雨间隔时间和空气温度的影响不显著,即相对系数R^2最小。

为了进一步分析降雨特征对降雨再分配各组成要素的影响,根据相关系数绝对值的大小(表现为降雨量>降雨历时>10 min最大雨强>平均降雨强度>降雨间隔时间),选取了降雨量、降雨历时和10 min最大雨强这3个因素。

表3 冠层降雨再分配与气象因子的Pearson相关系数

降雨再分配组成要素	降雨量	降雨历时	降雨间隔时间	平均降雨强度	10 min最大雨强	空气温度	空气相对湿度	风速
穿透雨量	0.998**	0.937**	0.241	0.292	0.441**	−0.114	0.479**	−0.421*
穿透雨率	0.772**	0.719**	0.084	0.487**	0.566**	−0.193	0.461**	−0.216
树干茎流量	0.964**	0.916**	0.224	0.207	0.311	−0.098	0.469**	−0.480**
树干茎流率	0.916**	0.870**	0.148	0.200	0.296	−0.067	0.470**	−0.401**
截留量	0.777**	0.778**	0.249	0.273	0.517**	0.032	0.373*	−0.287
截留率	−0.777**	−0.724**	−0.085	−0.486**	−0.565**	0.192	−0.463**	0.219

注:**和*分别表示该值在0.01和0.05水平上差异显著。

2.3.1 降雨量对降雨再分配的影响 青海云杉穿透雨量、树干茎流量与降雨量之间均呈线性正相关(图1A、图1B,$P<0.01$);由回归方程可知,产生穿透雨和树干茎流的临界降雨量分别为1.9 mm和7.7 mm,而在实际观测中发现,降雨量大于0.8 mm时林内开始产生穿透雨,降雨量大于9.6 mm时产生树干茎流,二者存在有差别。截留量与降雨量之间呈对数函数关系(图1C,$P<0.01$),即当降雨量<15 mm时,截留量急

剧上升,之后随着降雨量的增大逐渐趋于稳定。

青海云杉穿透雨率、树干茎流率、截留率与降雨量之间均呈对数函数关系(图 1D,E,F,$P<0.01$),即随着降雨量的增大,穿透雨率和树干茎流率呈先快速增大后缓慢增大,而截留率呈先快速减小后缓慢减小;当降雨量>15 mm 时,穿透雨率、树干茎流率、截留率均逐渐趋于稳定,分别介于 72%～91%,0.52%～0.88%和 11%～27%。

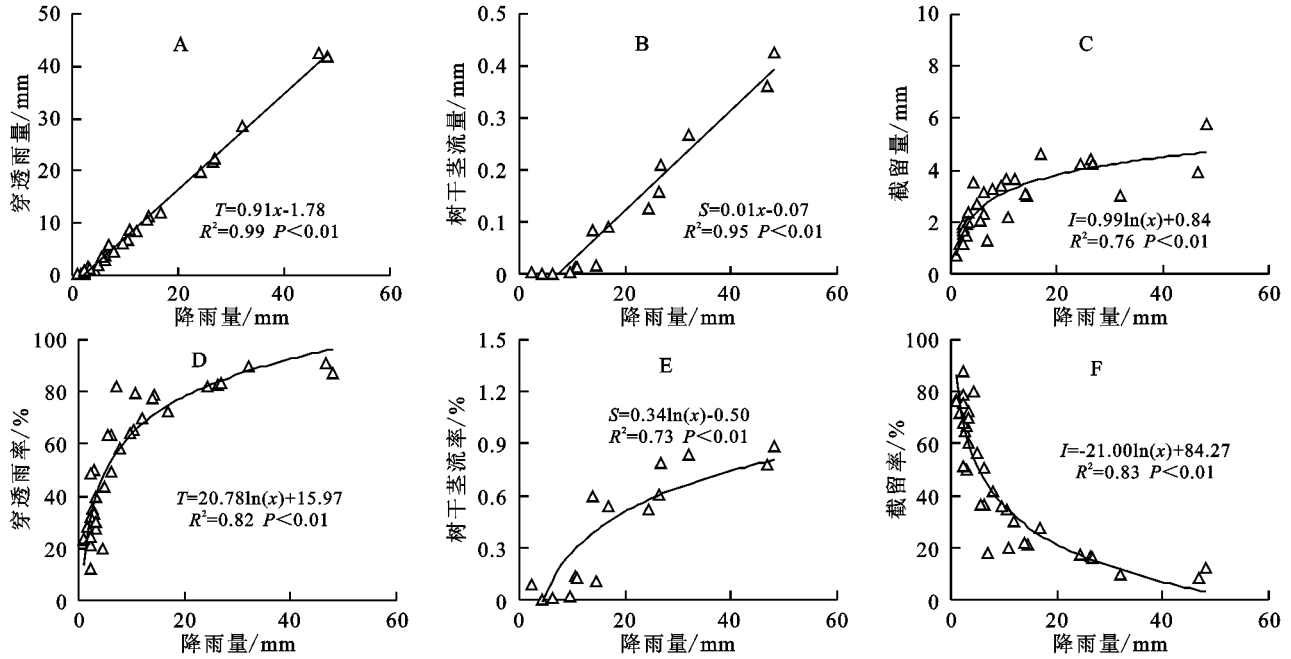

图 1　降雨量与冠层降雨再分配组成要素的关系

2.3.2　降雨历时对降雨再分配的影响　青海云杉穿透雨量、树干茎流量与降雨历时之间均呈线性正相关(图 2A,B,$P<0.01$)。截留量与降雨历时之间呈对数函数关系(图 2C,$P<0.01$),即当降雨历时<400 min 时,截留量随降雨历时的增加而增加,当降雨历时>400 min 时,截留量的增加幅度变缓并逐渐趋于稳定。

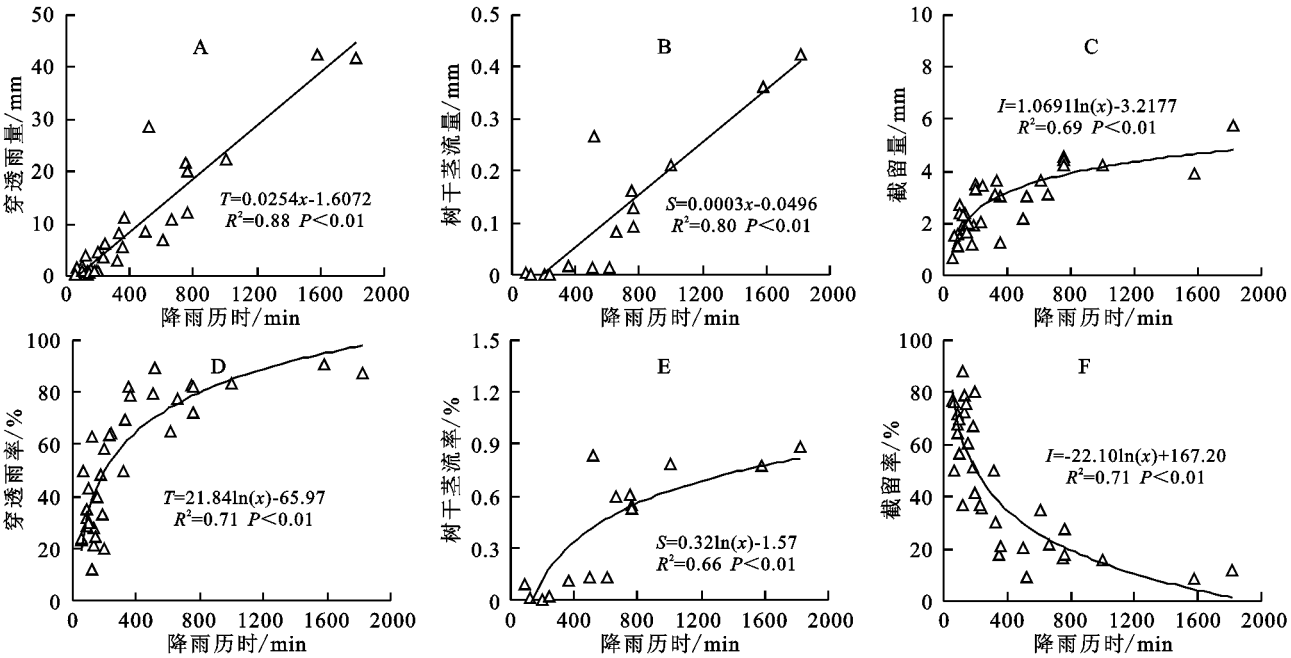

图 2　降雨历时与冠层降雨再分配组成要素的关系

青海云杉穿透雨率、树干茎流率、截留率与降雨历时之间均呈对数函数关系(图 2D,E,F,$P<0.01$),即穿透雨率和树干茎流率随降雨量的增大而增大,穿透雨率在降雨历时>400 min 时趋于稳定,介于 69%～90%,树干茎流率在降雨历时>650 min 时趋于稳定,介于 0.52%～0.90%,而截留率随降雨量的增大而减小,当降雨历时>400 min 时趋于稳定,截留率介于 9%～35%。

2.3.3　降雨强度对降雨再分配的影响　青海云杉穿透雨量与 10 min 最大雨强之间呈指数函数关系(图 3A,$P<0.05$),当 10 min 最大雨强<6 mm/h 时,穿透雨量较稳定,介于 0.2～22 mm,之后随着雨强的

增大，穿透雨量变化幅度增大，介于 1.4～42.4 mm。穿透雨率与 10 min 最大雨强之间呈对数函数关系（图 3D，$P<0.05$），穿透雨率随 10 min 最大雨强的增大而增大，当 10 min 最大雨强＞6 mm/h 时，穿透雨率趋于稳定。10 min 最大雨强对树干茎流量（率）影响较小，二者没有明显规律（图 3B，E）。林冠截留与 10 min 最大雨强之间呈对数函数关系（图 3C，F，$P<0.05$），即随降雨量的增大，截留量呈先快速增大后缓慢增大，而截留率呈先快速减小后缓慢减小，当 10 min 最大雨强＞3 mm/h 时，两者都逐渐趋于稳定。

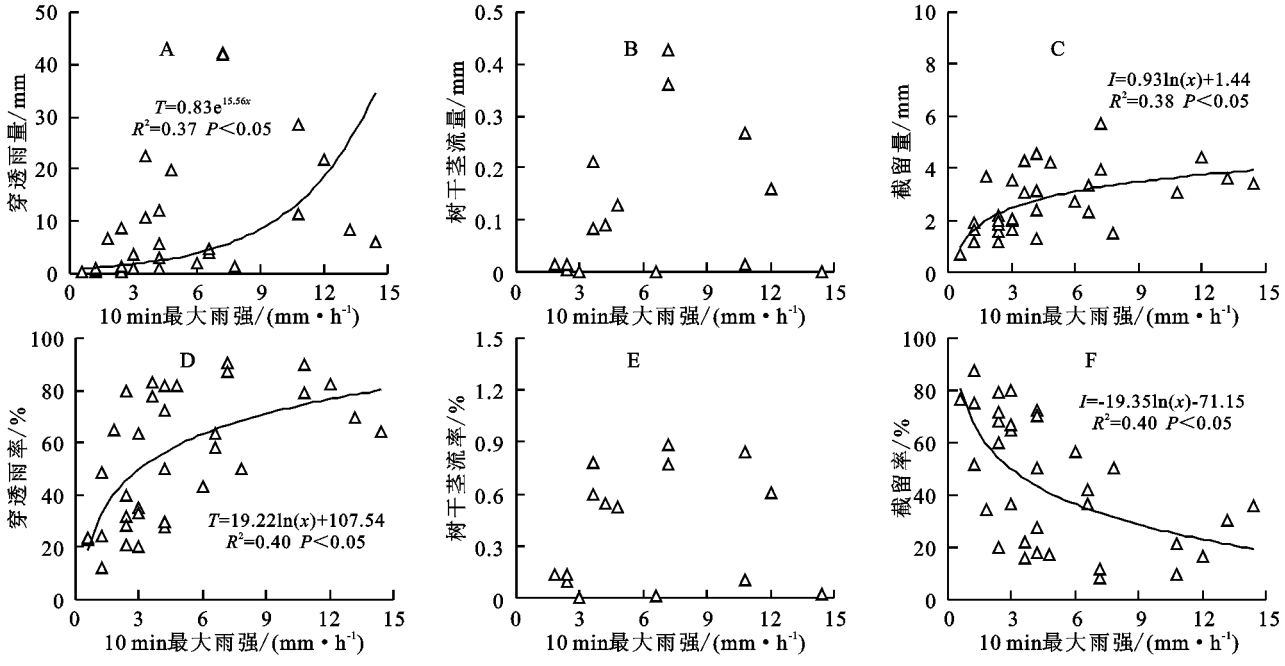

图 3 10 min 最大雨强与冠层降雨再分配组成要素的关系

3 讨 论

降雨再分配各组成要素（穿透雨、树干茎流和林冠截留）在森林生态系统水文循环和水量平衡中具有极其重要的作用[7,12]。基于 2015 年 5—9 月期间的野外观测数据，深入分析了祁连山排露沟小流域青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素。结果表明，当降雨量大于 0.8 mm 时，青海云杉林内产生了穿透雨，这与张学龙等[8]的研究结果基本一致。而且，测得青海云杉林的总穿透雨量为 275.9 mm，占总降雨量的 75.04%，穿透雨率介于 12.13%～90.80%，这与田凤霞等[7]测得祁连山中段大野口流域青海云杉林的穿透雨率（75.8%）基本一致。但相比于六盘山[13]的辽东栎（*Quercus liaotungensis*）（80.14%）和华山松（*Pinus armandii*）（83.67%）等树种的穿透雨率，青海云杉林的穿透雨率明显较小。这是由于林分密度、郁闭度和林冠结构等因素会影响穿透雨率[2,9]，青海云杉林的林分密度（1 725 株/hm^2）高于辽东栎林（600 株/hm^2）和华山松林（575 株/hm^2）。

本研究还发现，在前日未降雨的条件下，当降雨量大于 9.6 mm 时，青海云杉林产生树干茎流。田凤霞等[7]发现降雨量达到 5.6 mm 时青海云杉就开始产生树干茎流，张学龙等[8]发现青海云杉发生树干茎流的临界降雨量为 13.6 mm，党宏忠等[10]发现青海云杉发生树干茎流的临界降雨量为 6.5 mm，以上结论与本研究结果相差较大。这是由于不同区域青海云杉林的树龄及郁闭度有差别，而且树干茎流的产生与雨前林冠、树干的湿润程度有很大的关系。本研究还测得青海云杉林的总树干茎流量为 1.8 mm，占总降雨量的 0.48%，平均树干茎流率为（0.17±0.30）%，介于 0.00%～0.88%。与六盘山[13]的辽东栎（1.92%）、油松（*Pinus tabulaeformis*）（1.36%）、华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）（0.63%）和华山松（0.53%）等树种的研究结果相比，青海云杉的树干茎流率明显较小。这是由于青海云杉林的树皮呈片状，延缓了树干茎流的运动，而且，枝条的开张角度较大，针叶为四棱形，使得林冠汇集降水到树干的能力较小，故导致青海云杉的树干茎流量较其它树种小。

统计分析得到，青海云杉林的总截留量为 90.8 mm，占总降雨量的 24.48%，截留率介于 8.42%～87.87%。国外学者发现温带针叶林树冠截留率介于 20%～40%[7]，我国学者[14]发现南北不同气候带针叶林林冠截留率介于 14.5%～50.0%，金博文等[11]发现中、高郁闭度青海云杉林的截留率介于 22.6%～34.5%，这些结论均与本文的研究结果相符合。但相比与六盘山[13]的辽东栎（17.94%）、油松（15.69%）、华北落叶松（17.17%）和华山松（15.80%）等树种的截留率，青海云杉的截留率明显较高。这是由于不同的植被类型间，林分密度、郁闭度和冠层结构有差异，进而会影响截留率[9]；而且，研究区主要以≤15 mm 的降雨事件为主，占总降雨场次的 79.4%，使得青海云

杉林冠层能够最大可能的发挥截留能力,每次降水结束后都能趋于饱和。

穿透雨、树干茎流和林冠截留均受降雨特征、林冠特征、雨前林冠的湿润程度、风速和地形等多种因素的影响[15]。本研究发现青海云杉林穿透雨量(率)、树干茎流量(率)和截留量与降雨量、降雨历时、降雨持续时间、降雨强度、空气相对湿度均呈正相关,与空气温度和风速均呈负相关,而截留率与空气温度和风速呈正相关,与其它气象因素呈负相关,这与许多学者的研究结果[15-16]基本一致。而且,还发现降雨量、降雨历时与降雨再分配各组成要素的相关性极显著,表现为青海云杉穿透雨量与降雨量之间呈线性关系,这与许多学者的研究结果一致[2,16],但各自线性方程的斜率不同,这说明不同的植被类型间,穿透雨量增大的幅度也不同;穿透雨率和树干茎流率均随降雨量的增大呈先快速增大后缓慢增大,而截留率呈先快速减小后缓慢减小,三者最后均趋于稳定,这与田凤霞等[7]的研究结果基本一致。降雨强度对降雨再分配各组成要素的分配状况也有很大的影响;其中,10 min 最大雨强对降雨再分配各组成要素的影响程度较平均降雨强度明显,这是由于次降雨过程中降雨量分配不均匀,平均降雨强度不能很好地反映林地实际的降雨强度。风速与树干茎流呈极显著的负相关,这是由于风速能使作用在树干表面的空气发生移动,增加了降雨时树干表皮的水分蒸发,而且,风吹动树干时,会使一部分树干茎流滴落到林地。总体来看,影响降雨再分配特征的因素非常复杂,它还与叶面积指数、冠层厚度和郁闭度等冠层结构特征有关,它们之间的关系还需作进一步研究。

4　结 论

(1)青海云杉林的总穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量分别为 275.9 mm,1.8 mm 和 90.0 mm,分别占总降雨量的 75.04%,0.48%和 24.48%,分别介于 12.13%～90.80%,0.00%～0.88%和 8.42%～87.87%,在不同降雨量等级之间存在差别;随着雨量级的增大,穿透雨量和树干茎流量均不断增大,穿透雨率和树干茎流率呈增大的趋势,但截留率呈减小的趋势。

(2)相关性分析表明,穿透雨量(率)、树干茎流量(率)和截留量与降雨量、降雨历时、降雨持续时间、降雨强度、空气相对湿度均呈正相关,与空气温度和风速均呈负相关,而截留率与空气温度和风速呈正相关,与其它气象因素呈负相关。其中,降雨量和降雨历时对降雨再分配各组成要素的影响最为显著。

(3)降雨量和降雨历时与穿透雨量、树干茎流量之间均呈线性正相关关系($P<0.01$),而与截留量、穿透雨率、树干茎流率、截留率之间均呈对数函数关系($P<0.01$);10 min 最大雨强与穿透雨量之间呈指数函数关系($P<0.05$),与穿透雨率、林冠截留量(率)之间呈对数函数关系($P<0.05$),而与树干茎流的关系不明显。

(4)在整个试验期间,青海云杉林内的降雨量大于 0.8 mm 时开始产生穿透雨;当降雨量大于 9.6 mm 时,林内产生树干茎流。

参考文献:

[1] Marin C T, 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]. Journal of Hydrology, 2000, 237(1): 40-57.

[2] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等. 六盘山华山松(*Pinus armandii*)林降雨再分配及其空间变异特征[J]. 生态学报,2009,29(1):76-85.

[3] 陈书军,陈存根,曹田健,等. 降雨特征及小气候对秦岭油松林降雨再分配的影响[J]. 水科学进展,2013,24(4):513-521.

[4] 王少昆,赵学勇,左小安,等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛下土壤水分对降雨响应的空间变异性[J]. 干旱区研究,2008,25(3):389-393.

[5] Sun G, McNulty S G, Amatya D M, et al. Acomparison of the watershed hydrology of coastal forested wetlands and the mountainous uplands in the Southern US[J]. Journal of Hydrology, 2002, 263(1/4): 92-104.

[6] Delphis F L J, Ethan E F. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems[J]. Journal of Hydrology, 2003, 274(1/4): 1-29.

[7] 田风霞,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):1066-1076.

[8] 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.

[9] 刘旻霞. 青海云杉林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.

[10] 党宏忠,周泽福,赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):60-64.

[11] 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 1):39-42.

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

[13] 徐丽宏,时忠杰,王彦辉,等. 六盘山主要植被类型冠层截留特征[J]. 应用生态学报,2010,21(10):2487-2493.

[14] 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林冠截留过程研究[D]. 兰州:兰州大学,2010.

[15] 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.

[16] 何常清,薛建辉,吴永波,等. 岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配[J]. 应用生态学报,2008,19(9):1871-1876.