

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

刘建立^{1,2}, 王彦辉¹, 于澎涛¹, 程丽莉³, 熊伟¹, 徐丽宏¹, 张淑兰¹, 杜阿朋¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学/
水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 北京 100083; 3. 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093)

摘要: 于 2006—2007 年生长季(5—10 月)定位监测了六盘山北段叠叠沟小流域华北落叶松人工林的穿透雨、树干茎流和林冠截留特征,并基于同期气象数据初步分析了有关因素的影响。结果表明:林下穿透雨率存在明显的空间异质性,这种差异随着降雨量增大而变小。在整个测定期间,华北落叶松林穿透雨占总降雨量的(74.94±2.4)% ,树干茎流占(0.16±0.03)% ,而林冠截留占(25.08±2.41)%。穿透雨、树干茎流和林冠截留的数量与降雨量呈正相关($p<0.01$),随着雨量或雨强的增加,穿透雨率升高,并且在高的雨量(>20 mm)和雨强(>5 mm/h)下逐渐趋于稳定。当降雨量到达 6.44 mm 时开始出现树干茎流。林冠截留率与降雨量、降雨历时和空气相对湿度呈显著负相关($p<0.05$)。

关键词: 六盘山;华北落叶松;穿透雨;树干茎流;林冠截留

中图分类号:S715.2 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2009)04-0076-06

Characteristics of Rainfall Redistribution under the Canopy of *Larix Principis-rupprechtii* Forest in Diedieougou watershed of Liupanshan Mountains

LIU Jian-li^{1,2}, WANG Yan-hui¹, YU Peng-tao¹, CHENG Li-ly³,
XIONG Wei¹, XU Li-hong¹, ZHANG Shu-lan¹, DU A-peng¹

(1. The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091;
2. Beijing Forestry University/Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Ministry of Education
Beijing 100083; 3. Institute of forestry and Pomology, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100093)

Abstract: Though a field investigation during growing season from May to October in 2006 and 2007 the partitioning of gross rainfall into throughfall, stemflow and canopy interception in the *Larix principis-rupprechtii* forest was studied in the small watershed of Diedieougou located at the north part of Liupan Mountains, Ningxia. And the influence of meteorological factors was evaluated based on the simultaneous weather observation. An obviously spatial variation of throughfall ratio was observed, and this spatial variation declined with rising rainfall depth. The results also showed that throughfall, stemflow, and canopy interception accounted for (74.94±2.4)% , (0.16±0.03)% , and (25.08±2.41)% of the total rainfall, respectively. The amount of throughfall, stemflow and canopy interception was significantly ($p<0.01$) and positively correlated with rainfall depth. As rainfall depth and intensity increased, the throughfall ratio in gross rainfall increased, but will gradually stabilized when the rainfall depth was higher than 20 mm and the rainfall intensity was higher than 5 mm/h. The stemflow began to appear when the rainfall depth arrived at 6.44 mm. The canopy interception ratio in gross rainfall decreased significantly ($p<0.05$) and hyperbolically with increasing rainfall depth, rainfall duration, and air humidity.

Key words: Liupan Mountains; *Larix principis-rupprechtii*; throughfall; stemflow; canopy interception

冠层的降水再分配作用是森林生态系统的重要水文功能之一^[1-3]。大气降水进入森林生态系统后,首先由林冠对降雨进行第一次分配,这一过程中不仅消减了降雨动能,同时导致森林群落内的水分分配格局发生变化,部分降水受到植物表面截留而损失,大部分形成了穿透雨及树干茎流^[4]。对绝大多数森林来说,穿透雨和树干茎流是土壤水分的最主要来源,而且具有明显的汇集效应^[5]。尤其在降水少的干旱地区,树干茎流对抵抗干

收稿日期:2009-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40730631,40671038,30671677,40801017);科技部“十一五”科技支撑计划项目课题(2006BAD03A1803),中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAF YBB2007038,CAFRI200702);科技部科研院所社会公益研究专项(2004DIB3J102);国家林业局森林生态环境重点实验室项目

作者简介:刘建立(1978—),男,博士后,主要从事森林生态水文研究。E-mail: liujianli7331@sina.com.cn

通讯作者:王彦辉(1957—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为森林水文学。E-mail: wangyh@caf.ac.cn

早和支持树木个体生长具有重要作用^[6]。因此在森林水文研究中,理解林冠的降水再分配具有突出意义^[7-8]。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是我国北方许多地区的主要造林树种之一。该树种1964年引入宁夏南部的六盘山地区,表现出适应性较强、生长良好,主要用于土石山区造林,在水源涵养林建设中发挥着重要作用^[9],成为宁南山区生态恢复建设中的重要树种之一。本文定位观测了华北落叶松林的截留、穿透雨、树干茎流等林冠水文功能特征,旨在定量探讨其林冠的降雨再分配作用,揭示森林冠层的水文效应。

1 研究区自然概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市(东经106°09′—106°30′,北纬35°15′—35°41′)原州区叠叠沟林场,该小流域面积25.4 km²,海拔1 975~2 615 m。属于典型的大陆性季风气候,该地年均气温6~7℃,无霜期130 d左右,年均降雨量428 mm,主要集中在7—9月份。本区植被的水平分布属于温带草原区的南部森林草原地带,由于长期受人类强烈干扰,形成了多种土地利用方式镶嵌的景观格局。土壤以灰褐土面积最大,黄土次之。

2 研究林分及方法

2.1 研究林分

选择生长良好的华北落叶松人工纯林,建立1个20 m×20 m的样地,其海拔为2 012 m,位于阴坡下部(北偏西30°),平均坡度10°;林分密度1 650株/hm²,平均林龄20 a,郁闭度0.7,平均高(8.0±1.59)m,平均胸径(9.0±3.43)cm。林下灌木层不明显,有极少量沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、二色胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、绣线菊(*Spiraea* sp.)等,盖度2%左右。林下草本层发育较好,主要分布有铁杆蒿(*Artemisa vestita*)、茼蒿(*Artemisia giraldii*)、羽叶凤毛菊(*Saussurea maximowczii*)、白颖苔草(*Carex rigescens*)等,盖度80%。土层较厚,大于2 m。

2.2 研究方法

2.2.1 林外降雨测定 在距离华北落叶松林样地200 m的林外空旷地,利用自动气象站(Watchdog,美国,Corbett Research公司)和虹吸式自记雨量计测定林外降雨量和降雨过程。

2.2.2 穿透雨测定 在样地内相隔5 m划方格线,机械布设16个自制的标准雨量筒(镀锌铁皮制作,直径20 cm,高40 cm),为避免降雨期间蒸发带来的误差,雨量筒上带漏斗装置(直径20 cm,高10 cm),内连接盛雨瓶。布设雨量筒时去除周围的草本植被,使其低于雨量筒。雨后测定穿透雨量(mm)。

2.2.3 树干茎流测定 根据华北落叶松林样地的树木径级(按2 cm一个径阶划分)分布(图1),共选择代表性样树5株,在树干基部60~130 cm间将剖开的PVC管螺旋状嵌入树干四周,并将其导入树干基部的塑料桶内,雨后收集树干茎流,按照下式计算林分的树干茎流量:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times M_i}{S \times 10^4}$$

式中: C ——林分的树干茎流量(mm); n ——树干径级数; C_i ——第 i 径级单株树干茎流体积(ml); M_i ——第 i 径级的树木株数; S ——样地面积(m²)。

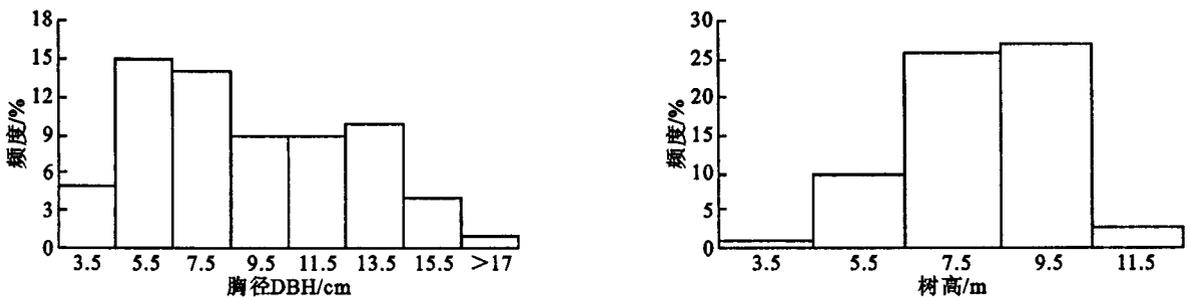


图1 华北落叶松林分的胸径和树高分布

2.2.4 林冠截留量计算 采用水量平衡计算林冠截留量:

$$I = P - T - C$$

式中: I ——林冠截留量(mm); P ——林外降雨量(mm); T ——穿透雨量(mm); C ——树干茎流量(mm)。

2.2.5 数据分析 使用SPSS13.0统计软件和Excel对数据进行分析。

3 结果与分析

在观测期间(2006—2007年生长季,即5—10月份),共记录有效降雨事件46次,对其分析(图2)表明,降雨以小雨为主,雨强普遍较小。雨强小于2.5 mm/h的小雨占总记录降雨次数的40.7%,雨强为2.5~8 mm/h的中雨占观测降雨次数的15.8%,雨强大于8.0 mm/h的大雨以及暴雨所占降雨次数的比例仅为10.5%,

平均次降雨强度为 4.7 mm/h。从雨量级分布来看,次降雨量最大值为 66.1 mm,最小值为 0.6 mm,平均次降雨量为 11.1 mm。从图 2 可以看出,次降雨小于 2 mm 雨量级的频率最大,占总降雨次数的 30.1%。

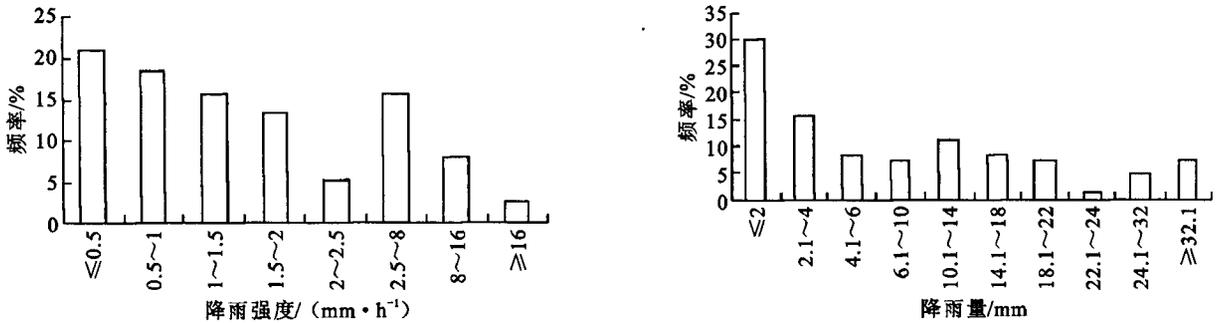


图 2 林外降雨量和强度的频率

3.1 林冠对降雨空间分布格局的影响

林冠下穿透雨的空间变异性受多个因素综合影响,包括叶面积指数、冠层厚度、降雨量大小、离树干距离、冠形、气象因素以及与周围林木的关系等^[10-11]。基于 2006—2007 年林下雨量筒观测点的穿透雨数据,图 3 表示了华北落叶松林下不同观测点上穿透雨率的显著差异($p < 0.05$),在某些情况下有的测点超过 100%,表明此处有明显的降雨汇聚效应。在较小降雨量时这种汇聚效应还不明显,但随着降雨量增加有增加趋势,不同降雨量时穿透雨率大于 100%的测点比例随降雨量的变化关系为:

$$TF = 1.0009P + 7.91 \quad p < 0.01 \quad R^2 = 0.31 \quad n = 46$$

式中:TF——穿透雨率大于 100%测点比例(%);P——大气降雨量(mm)。

不同测点间穿透雨的变异系数与降雨特征有密切关系,其变异程度随降雨量的增加而减低,两者呈一定的负相关。不同降雨量时穿透雨的变异系数随降雨量的变化关系为:

$$CV(TF) = 17.94 + 70.68/P \quad p < 0.01 \quad R^2 = 0.57 \quad n = 46$$

式中:CV——不同观测点间穿透雨率的变异系数(%);TF——穿透雨率(%),P——大气降雨量(mm)。

Loescher^[12]等认为,巨大的树冠和林冠空隙是产生林下穿透雨差异的主要原因。在不同林分的研究中也发现了穿透雨水平空间异质现象,但研究结论并不一致。一种观点认为穿透雨空间分布具有系统性的规律性的变化趋势^[13];另一种观点认为,林下穿透雨的空间分布是随机的,与空间位置无关^[14],这可能是与不同研究的地点、树种和降雨特性有关系。本研究发现,不同位置的穿透雨量差别具有一定规律,不完全是随机的。穿透雨率在树冠半径的中部显著高于树冠边缘和树干基部(图 4),这是由于华北落叶松的锥形树冠结构使得树冠中心冠层厚、枝叶密集,还由于一些枝条下垂使得树冠具有向树冠外缘汇集降雨的作用。在降雨量较小时,冠层结构是引起穿透降雨率空间变异的主要因素;而在降雨量大时,冠层结构的影响减弱,穿透降雨的空间分布差异更多表现出随机性,这里可能与风等随机因素的影响有关,有待于进一步研究。

3.2 穿透雨量随降雨特征的变化

在 2 年的生长季研究期间,到达林内的穿透雨量为 710.2 mm,占观测期间降雨量的(74.94±2.4)%。由图 3 可以看出,华北落叶松林的穿透雨量和穿透雨率与降雨量呈极显著的线性正相关($P < 0.01$)。穿透雨率与降水量之间属非线性关系,在降雨量 < 20 mm 时,一般随降雨量增加而增大,但之后增加趋势逐渐变缓;穿透雨率随着雨强增加也呈现上升趋势,并最后稳定在 90%左右(图 5)。

3.2 树干茎流量随降雨特征的变化

树干茎流在森林降雨再分配中所占的比例较小,一般约为 0~5%^[15],因此,树干茎流在森林对降雨分配的

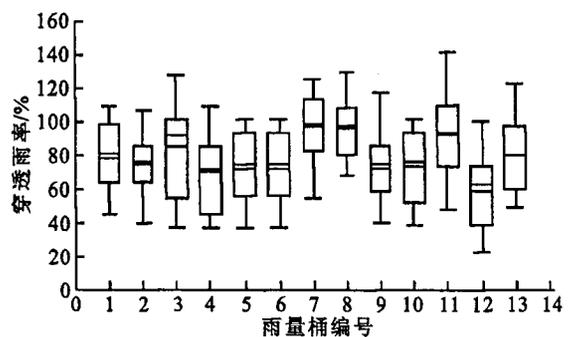


图 3 不同观测点穿透率的箱图

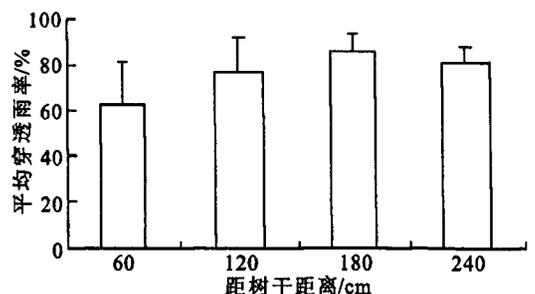


图 4 单株林下距树干不同距离穿透雨的变化

影响中常会被忽略。但是,树干茎流作为林内水分输入的重要组成部分,其所含的营养浓度远高于穿透雨和大气降水。同时,茎流雨水及其所含养分入渗分布范围小,仅限于树干基部四周,并能沿根的生长方向直接进入土壤,可被植物直接吸收,具有加速植物生长和促进养分循环的重要作用^[16]。

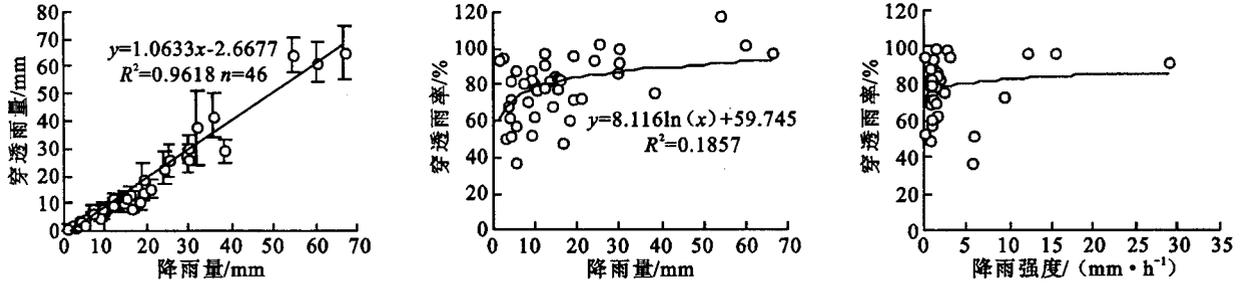


图 5 华北落叶松林穿透雨量和穿透雨率与雨量及雨强的关系

在 2 年生长季的观测期间,华北落叶松树干茎流量为 6.32 mm,仅占同期降雨量的(0.16±0.05)%。由图 6 可以看出,华北落叶松林的树干茎流量与降雨量具有显著的线性正相关($P < 0.01$),随着降雨量增加而增大。线性回归方程在 X 轴的截距为 6.44 mm,表明当降雨量大于 6.44 mm 时才能产生树干茎流。树干茎流率与降雨量也呈现正相关性($P < 0.05$),随着降雨量增加而增大,但在降雨量 > 50 mm 时渐趋稳定。然而,树干茎流量随着降雨强度增加呈现下降趋势。

对不同胸径观测样树的树干茎流分析可以看出,树干茎流存在较大差异,其变异系数随胸径的增加而减少,这可能是由于小径阶的华北落叶松冠幅小,林冠截留的雨水大部分顺树干流下有关。树干茎流的变异系数还与降雨量有关,随着雨量增加而降低,其关系式为:

$$CV = -1.53P + 81.06 \quad R^2 = 0.636 \quad n = 5$$

式中:CV——树干茎流的变异系数(%);P——大气降雨量(mm)。

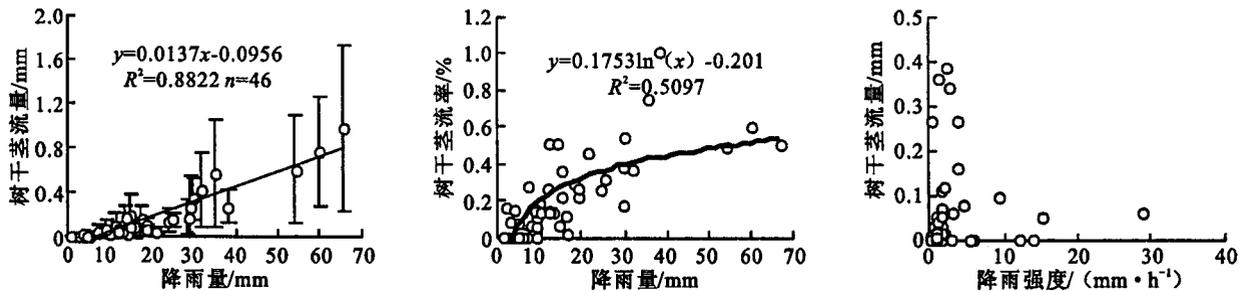


图 6 华北落叶松林的树干茎流量和茎流率与雨量及雨强的关系

3.3 林冠截留量随降雨特征的变化

在测定期间,华北落叶松林冠截留量为 130.1 mm,占同期降雨量的(25.08±2.41)%。林冠截留量与降水量显著相关($P < 0.01$),随着降雨量增加而上升并渐趋相对稳定,这主要是由于存在林冠截留容量的限制,在林冠饱和以后,林冠截留的增加仅是降雨过程中林冠表面截持雨水的蒸发所致^[17],利用大于 5 mm 的降雨场次做回归分析,得出本研究区华北落叶松的冠层容量为 1.4 mm^[18]。林冠截留率随着降雨量增加而逐渐减少,在雨量较大时稳定在 10%左右;林冠截留率与雨强相关不紧密,但在一定程度上表现为随雨强增大而降低(图 7)。

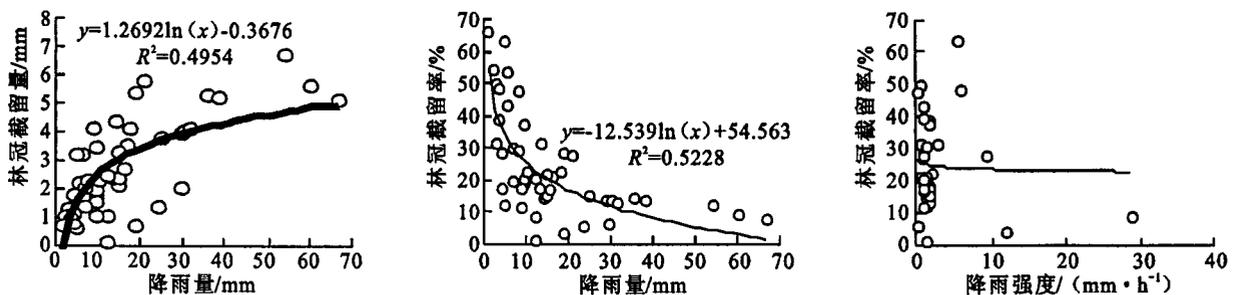


图 7 华北落叶松林冠截留量和截留率与雨量及雨强的关系

3.4 降雨再分配比例随雨量等级的变化

林冠对降雨的再分配,不仅受到树种、林木生长特征等植被因素的影响,也受到雨量和雨强等降雨特征的制约^[19],但对于某一特定林分来讲,主要受降雨特征影响。研究期间,华北落叶松的林冠穿透雨率平均为

(74.94±2.4)%，树干茎流率平均为(0.16±0.03)%，林冠截留率平均为(25.08±2.41)%。从降雨再分配比例随雨量级的变化(表 1)可以看出，随着降雨量等级提高，穿透雨率逐渐增加，在雨量 60 mm 时达到 98%~99%；树干茎流率也逐渐增加，在雨量 60 mm 时达到 0.5%；林冠截留率却呈下降趋势，由雨量 6 mm 时的 34.6%下降到雨量 60 mm 时的 1.3%。

表 1 华北落叶松林内的降雨再分配(平均值±标准差)随雨量等级的变化

降雨等级/mm	次数	平均降雨量/mm	穿透雨/mm	穿透雨率/%	树干茎流量/mm	茎流率/%	截留量/mm	截留率/%
1~10	20	6.0±2.8	4.4±2.4	72.7±16.6	0.0±0.0	0.1±0.1	1.6±1.1	34.6±16.6
10.1~21	15	15.3±2.9	10.1±3.6	77.8±17.1	0.03±0.01	0.20±0.21	2.5±1.8	19.8±9.0
20.1~30	6	27.6±2.9	26.4±2.8	94.6±5.5	0.1±0.0	0.3±0.1	1.4±1.6	10.9±4.4
30.1~40	2	35.1±3.0	33.2±2.1	94.4±0.3	0.3±0.1	0.7±0.3	4.9±0.6	13.9±1.0
50.1~60	2	57.1±4.3	52.9±3.2	99.5±0.1	0.3±0.1	0.5±0.1	6.9±0.8	10.9±2.2
>60.1	1	66.6±0.0	65.4±0.0	98.2±0.0	0.3±0.0	0.5±0.0	0.9±0.0	1.3±0.0

3.5 林冠截留的影响因素

影响林冠截留率的因素主要有：降雨量、降雨历时、降雨强度、次降雨与上一次降雨的间隔时间、降雨期间的气温、空气相对湿度以及风速等^[18]。由于各种影响因素之间存在一定的相互影响，因此，采用偏相关分析更能说明不同因素对林冠截留率的真实影响(表 2)。结果表明：林冠截留率与降雨量的相关极为显著，相关系数为-0.525 8($P<0.01$)；其次是降雨历时和空气相对湿度，相关系数分别为-0.317 8和-0.353 ($P<0.05$)；林冠截留率与降雨强度、降雨间隔时间、大气温度以及风速无显著相关。

表 2 华北落叶松林冠截留率与降雨特性及降雨期间气象因素的偏相关系数

	降雨量/mm	降雨历时/h	雨强/(mm·h ⁻¹)	降雨间隔时间/h	气温/℃	相对湿度/%	风速/(m·s ⁻¹)
林冠截留率/%	-0.5258	-0.3178	-0.1965	0.0472	-0.0177	-0.353	0.192
	$P<0.01$	$P<0.05$	$P=0.224$	$P=0.773$	$P=0.914$	$P<0.05$	$P=0.235$

4 讨论与结论

研究区华北落叶松林下穿透雨、树干茎流和截留量均与降雨量具有显著相关性($P<0.01$)，林冠截留率占大气降水的(25.08±2.41)%，介于大多数研究所得的林冠截留率变化范围(10%~36%)之内(Zhang, et al., 2006)。本文的华北落叶松林冠截留率高于时忠杰^[8]等(2006)在六盘山南段的测定的华山松(14.94%)、油松(15.69%)、辽东栎林(17.94%)和红桦林(8.59%)的林冠截留率，也高于同是华北落叶松林的 17.17%，这可能和本文所在的叠叠沟小流域的次降雨量(11.1 mm)小于六盘山南段(11.3 mm)，气候干燥导致雨中叶面雨水蒸发较强，本研究区林分密度(1 650 株/hm²)高于南坡林分(1 275 株/hm²)有关。

本研究林分中华北落叶松的树干茎流量占总大气降雨的(0.16±0.03)%，低于六盘山南坡测定的其它林分类型，如华山松林(0.72%)、油松林(1.36%)、辽东栎林(1.92%)和红桦林(0.23%)，这是因为华北落叶松具有锥形树冠结构，树枝水平分布，雨水不易到达主干，并且树皮粗糙，提升了树干的吸附水分能力，不易产生树干茎流，导致树干茎流率较小。本文的华北落叶松林干流率也低于在六盘山南坡测定的华北落叶松林干流率(0.63%)，可能主要因叠叠沟多为低强度和低雨量级的降雨。

本研究表明，林冠截留率主要受降雨量、降雨历时和间隔时间的影响。降雨强度对华北落叶松的林冠截留没有显著的影响，这与其他学者在地中海研究结果有一定的差异^[20]，造成这种差异的一个重要原因可能是两个地区的降雨特征不同，本研究区内的降雨主要以中小雨为主，很少出现暴雨，因此其雨强变化程度也较小。而降雨的持续时间一般较长，因此在降雨过程中的蒸发可能会增加冠层的截留量^[17]。

参考文献：

- [1] 李文华,何永涛,杨丽韞,等.森林对径流影响研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2001,16(5):398-406.
- [2] 石培礼,吴波,程根伟,等.长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的研究[J].自然资源学报,2004,19(3):351-490.
- [3] Bruijnzeel L A. Forest hydrology[M]// Evans J S. The Forestry Handbook, Vol. 1. Oxford:Blackwell, 2000:301-343.
- [4] Rowe L K. Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand[J]. J. Hydrol,1983,66:143-158.
- [5] 李振新,郑华,欧阳志云,等.岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征的研究[J].生态学报,2004,24(5):1015-1021.
- [6] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬,等.黄土高原人工油松林水文生态效应[J].生态学报,2003,23(2):376-379.

- [7] Sun G, McNuhy S G, Ama tya D M, et al. A comparison of the watershed hydrology of coastal forested wetlands and the mountainous uplands in the South US[J]. *Journal of Hydrology*, 2002,263:92-104.
- [8] 刘文杰,张克映,张光明,等. 西双版纳热带雨林干季林冠雾露水资源效应研究[J]. *资源科学*, 2001,23(2): 75-80.
- [9] 李怀珠. 论宁夏六盘山地区针阔混交水源涵养林工程建设现状及发展规划[J]. *宁夏农林科技*, 1999(3):22-24.
- [10] Herbst M, Roberts J M, Rosier P T W, et al. Measuring and modeling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006,141:244-256.
- [11] 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影响因素分析[J]. *林业科学*, 2006,42(12):3-20.
- [12] Loustau D, Berbigier P, Granier A, et al. Interception loss, throughfall and stemfall in maritime pine stand I. Variability of throughfall and stemfall beneath the pine canopy[J]. *Journal of Hydrology*, 1992. 138:449-467.
- [13] Link T E, Unsworth M H, Marks D, et al. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest[J]. *Agricultural. Forest Meteorology*, 2004,124:171-191.
- [14] Whelan M J, Aanderson J M. Modeling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce(*Picea abies*) plantation at the plot scale[J]. *Journal of Hydrology*, 1996. 186:335-354.
- [15] 鲍文,包维楷,何丙辉,等. 森林生态系统对降水的分配与拦截效应[J]. *山地学报*, 2004,22(4):483-491.
- [16] 马雪华. 在杉木林和马尾松林中雨水的养分淋溶作用[J]. *生态学报*, 1989,9(1): 15-20.
- [17] 王彦辉. 几个树种的林冠降雨特征[J]. *林业科学*, 2001,37(4): 2-9.
- [18] 郭明春,于澎涛,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):1633-1637.
- [19] 万师强,陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林冠层对降水的分配作用[J]. *植物生态学报*, 1999,23(6):557-561.
- [20] Llorens P R, Pech J, Latron J, et al. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results down to the event scale[J]. *Journal of Hydrology*, 1997: 331-345.

责任编辑:李鸣雷 刘 英