

连续降雨条件下黄土丘陵区两典型林分 降雨分配特征研究

张建国^{1,3}, 闫美杰^{1,2}, 杜盛^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:植被的降雨分配是重要的水文过程和生态功能。基于连续降雨条件下,采用雨量筒收集法,实地观测了黄土丘陵区两典型森林群落——辽东栎次生林和刺槐人工林的树干流和穿透雨。结果表明:连续降雨条件下,两典型森林群落穿透雨与降雨量之间存在极显著的相关关系,辽东栎林分穿透雨占降雨量的 86%,刺槐林分穿透雨占降雨量的 89%;辽东栎单株树干流与胸径之间呈显著正相关线性关系;辽东栎林分树干流和刺槐林分树干流与降雨量之间均存在极显著线性相关,两林分树干流分别占降雨量的 14% 和 6%,辽东栎林树干流和穿透雨之和与降雨量相等,表明该林分在连续降雨条件下,该林分树冠截流等于 0;刺槐树干流和穿透雨之和与降雨量相比,相差 5%,这可能与该林分灌木层的二次分配有关。

关键词:连续降雨; 树干流; 穿透雨; 冠层截留; 辽东栎; 刺槐

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)05-0158-06

Characteristics of Rainfall Partitioning in Two Typical Forests Under Continuous Rainfall in the Loess Hilly Region

ZHANG Jianguo^{1,3}, Yan Meijie^{1,2}, Du Sheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water

Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Rainfall partitioning by vegetation is important hydrological process and functions of ecosystems. We investigated the stem flow and throughfall in two typical forests: a natural *Quercus liaotungensis* dominated forest and a pure *Robinia pseudoacacia* plantation under continuous rainfall events by field observation using the rainfall collector. The results showed that there was significant linear relation between throughfall and gross precipitation in two typical forests for continuous rainfall events. Throughfall accounted for 86% and 89% of total rainfall in *Quercus liaotungensis* forest and in *Robinia pseudoacacia* plantation, respectively. Stem flow of individual trees of *Quercus liaotungensis* was positively linearly correlated with DBH (Diameter at breast height); stem flow of individuals of *Robinia pseudoacacia* was negatively linearly correlated with DBH. The proportions of stand stem flows in gross rainfall of two typical forests were 14% and 6%, respectively. The sum of stem flow and throughfall was equal to the gross rainfall in *Quercus liaotungensis* forest, indicating that there was no canopy interception for continuous rainfall events in this forest. The difference between the sum of stem flow and throughfall with the gross rainfall was 5% in *Robinia pseudoacacia* plantation, and maybe it was related with the redistribution of throughfall in the shrub layer in this plantation.

Keywords: continuous rainfall; stem flow; throughfall; canopy interception; *Quercus liaotungensis*; *Robinia pseudoacacia*

收稿日期: 2014-11-11

修回日期: 2015-11-15

资助项目: 国家自然科学基金(41171419, 41411140035, 41471440); 中国科学院知识创新工程“百人计划”项目(kzcx2-yw-BR-02)

第一作者: 张建国(1986—), 男, 山东肥城人, 博士, 主要从事流域生态与管理研究。E-mail: zhangjidezs@163.com

通信作者: 杜盛(1965—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士, 研究员, 主要从事半干旱地区植被恢复生态学、群落生态水文过程等研究。E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

林分冠层截留一直以来是森林水文研究的热点问题之一。林冠层在森林生态系统的水分循环和水量平衡中起了很重要的作用^[1]。在森林生态系统内,林冠层是影响其水量平衡的第一作用层。不同的森林植被类型具有不同的截留功能,降雨通过林冠层后,林冠截留率为10%~40%,林内降水透过率为60%~90%,树干流率为较小,在0.5%~14%^[2]。

通常情况下,树冠截留的研究是通过降雨量减去林分树干流和穿透雨量算得的。以往冠层截留的研究基于长期间断测量,即单次降雨条件下的监测研究,对于连续降雨条件下对林冠层的研究较少。研究表明,降雨的时间分布影响着冠层的干湿循环^[3],非连续降雨事件条件下,测得的冠层截留比较大^[4-5];然而,在连续降雨情况下,冠层截留与降雨量存在负相关关系^[6],冠层截留为负值^[7],换言之,连续降雨条件下,可以忽略总降雨和净降雨的差异,即冠层截留为零或负值^[8]。基于不同降雨机制对林冠截留的影响,本文以2013年7月延安极端连续降雨事件为背景,研究连续降雨条件下,黄土丘陵区两典型森林植被类型——辽东栎(*Quercus liaotungensis*)天然次生林和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林树干流、穿透雨和冠层截留的变化规律,为连续降雨条件下树干流、穿透雨和树冠截留的研究提供一定的数据和理论支持,为该地区不同植被覆盖下减少水土流失、抵御洪涝灾害提供理论依据。

1 研究区概况和试验方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市南郊公路山,36°25.40'N,109°31.53'E,海拔1353 m。该地区在生态景观的水平地带性上位于森林区与森林草原区的过渡地带,气候为温带半干旱大陆性季风气候。据延安市气象台资料,近20年(1988—2007年)平均年降水量为498 mm,平均气温为10.6℃,雨季集中于7—9月份,4—6月份为干旱季节(图1)。

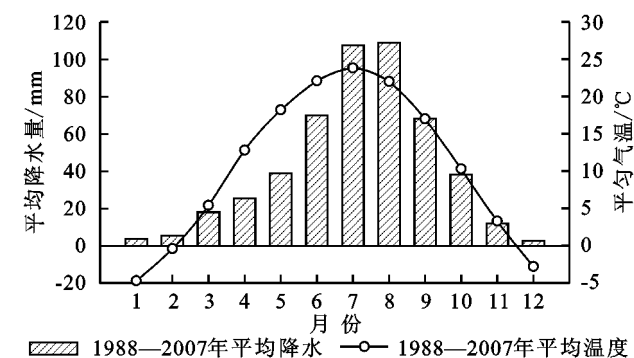


图1 1988—2007年延安市气候特征

辽东栎天然次生林固定监测样地:面积0.04 hm²,海拔1360 m,坡向西南,坡度22°,植被覆盖率约为75%。该林分以辽东栎和山杏(*Armeniaca sibirica* L.)为主要建群种的落叶阔叶混交林,其中伴生树种有:侧柏[*Platycladus orientalis* (L.) Franco]、桃叶卫矛(*Euonymus bungeanus* Maxim.)、大果榆(*Ulmus macrocarpa* Hance)和三裂槭(*Acer stenolobum* Rehd.)。林分平均年龄约为60 a;树木密度为1350株/hm²;林分树干基面积为20.5 m²/hm²,林分平均树高为(5.8±2.2) m,平均胸径为(10.2±6.1) cm。刺槐人工林固定监测样地:面积为0.04 hm²,海拔1350 m,坡向为东南坡,坡度26°,植被覆盖率约为90%。林分为刺槐人工纯林,林下植物稀疏杂生,主要包括:黄蔷薇(*Rosa hugonis* Hemsl.)、三裂槭(*Acer stenolobum* Rehd.)幼苗、白羊草[*Bothriochloa ischcemum* (L.) Keng]、水栒子(*Cotoneaster multiflorus* Bunge.)及铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb.)等。林分平均林龄为30 a,林分树木密度为3100株/hm²,平均胸径为(9.8±0.26) cm,平均树高为8.6 m,林分树干基面积为24.9 m²/hm²。两样地距离约为150 m,在距离辽东栎样地约为150 m的空白处设置有微型气象站,主要用于监测降雨量、风速、太阳辐射、空气温湿度等环境因子,考虑到不同监测设备可能引起的测量误差以及样地距离,因此降雨量数据采用同一套监测设备。本试验测定时间为2013年7月,该月降雨情况见图2。

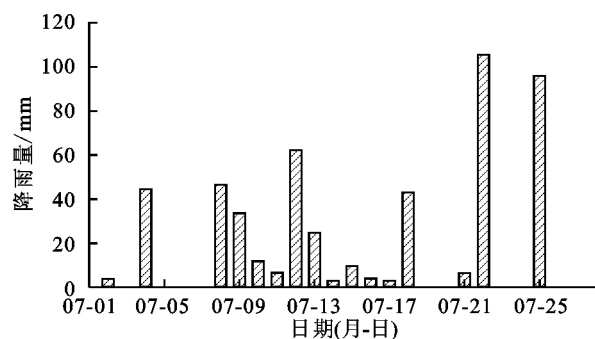


图2 研究期间样地的降雨特征

1.2 测定方法

1.2.1 降雨量 在林外一处4 m×4 m的空白地,利用翻斗式自计雨量计(Davis Rain collector II model 7852, Davis Instruments, USA)测量降水量(mm)。雨量筒距离地面约1 m的高度。

1.2.2 穿透雨与树干流 穿透雨的测定采用不锈钢集雨漏斗(内径约为20 mm,边缘厚度约为1 mm),降雨被收集在一个容积约为10 L的塑料桶内。穿透雨具有的空间差异性,在辽东栎次生林林内随机分布有17个穿透雨收集器。刺槐人工林由于林分布局相

对整齐,为减少雨量收集任务,刺槐林内只随机分布有 10 个雨量收集器。采用量筒测量收集的穿透雨,精度为 10 ml。林分穿透雨为该林分内所有穿透雨收集器测量值的均值。

根据两样地内各树种树木的径级分布,辽东栎林内选择 8 株辽东栎,2 株山杏和其他伴生树种(侧柏、大果榆、三裂槭、桃叶卫矛)各 1 株,刺槐样地选取 7 株刺槐样树分别测定其树干流。树干流监测具体操作方法如下:首先选取一根直径为 25 mm 的,长度略微小于树干胸径的橡胶管,将其用细铁丝固定在树干胸高处;再次,选取长度约为 1.2 m 长的同材质橡胶管,将其一端与固定在胸高处的橡皮管两端重合处;其次选用长度比树干胸径长的同材质橡胶管,将其剖开,缠绕在刚刚固定在胸高处的橡胶管上;最后采用玻璃胶将橡胶管接触的部位密封,仅保留一处出水口。树干收集的降雨量被储存在容积约为 100 L 的塑料桶内。根据以往经验,树干流容积较大,因此在 100 L 塑料桶的上端凿出 3 个等高度直径约为 25 mm 的圆孔,其中一个圆孔采用塑料管与容积约为 50 L 的塑料桶相连。树干流的测量只测量塑料桶中水的深度,根据建立的塑料桶深度与容积之间的线性方程推算树干流的容积量(L),林分树干流(S_F)的测定方法如下:

$$S_F=\frac{B_C\sum S_{F_0}}{A_G\sum B_{C_0}}$$

(1)

式中: S_F 为林分总树干流(mm); S_{F_0} 为各样树测得的树干流(L); B_{C_0} 和 B_C 分别为所选样树的胸高横断面

积和林分总胸高横断面积; A_G 为样地的投影面积。

1.2.3 林冠截留量 树冠截留量的计算公式^[9-10]如下:
$$I=P-(P_T+S_F)$$
(2)

式中: I 为林冠截留量(mm); P 为林外降雨量(mm); P_T 为穿透雨量(mm); S_F 为树干流(mm); (P_T+S_F) 为净降雨量,即林内降雨量(mm)。

2 结果与分析

2.1 总降雨

据新华网报道^[11],2013 年 7 月 3—26 日是延安市自 1945 年有气象记录以来过程最长、强度最大、暴雨日最多且间隔日最短的一次持续强降雨,超过百年一遇标准。如图 1—2 所示,该月份总降雨为 504.4 mm,与该地区多年平均降雨量(498 mm)相比,高 1.29%。本研究监测时间从 7 月 3—25 日,辽东栎次生林共记录 11 次降雨事件,刺槐人工林共记录 10 次降雨事件,记录总降雨量为 466.4 mm,各降雨事件具体时间及降雨量情况见表 1—2。某些情况下,当降雨持续超过 1 天以上时,连续降雨记为 1 次降雨事件,降雨事件的记录根据实际情况决定,原则是为了保证树干流和穿透雨的准确性,例如监测期间最大降雨事件出现在 7 月 24 日,降雨量为 112.2 mm,该降雨量实际为 7 月 21 日(6.4 mm)、7 月 22 日(105.6 mm)和 7 月 24 日(0.2 mm)降雨量之和。监测期间,各降雨事件中,小于 5 mm 降雨为 2 次,大于 5 mm 小于 20 mm 为 2 次,其余均大于 20 mm。

表 1 辽东栎林各降雨事件中各分量的监测数据及比例

降雨事件	日期	降雨量/ mm	穿透雨/ mm	穿透 率/%	树干 流/mm	树干流 比例/%	树冠 截留/mm	树冠截 留率/%
1	07-03	44.6	40.35	90				
2	07-09	80.2	66.95	83	11.02	14	2.22	2.77
3	07-10	11.8	10.34	88	1.81	15	−0.35	−2.97
4	07-12	68.8	52.75	77	9.36	14	6.68	9.71
5	07-13	24.8	23.55	95	4.72	19	−7.54	−30.40
6	07-14	3	4.07	136	0.42	14	−1.49	−49.67
7	07-15	9.6	10.03	104	1.47	15	−1.90	−19.79
8	07-16	4	4.26	107	0.35	7	−0.62	−15.50
9	07-19	46	42.12	92	5.49	12	−1.61	−3.5
10	07-24	112.2	93.56	84	16.42	15	1.22	1.10
11	07-25	96	89.52	93	13.47	14	−6.99	−7.28

2.2 穿透雨

穿透雨具有很强的空间差异性,不同位点测得的穿透雨的量差异很大,同时雨量收集器的尺寸也影响最少穿透雨收集器数量的重要因素之一,Rodrigo 和 Avila 研究表明,采用 9~11 个直径为 20 mm 的收集器,平均 1 周穿透雨的误差约为 10%^[12];10~12 个直径为 20 mm 的收集器可以代表林分穿透雨量^[13]。

因此,本文认为辽东栎林和刺槐林穿透雨收集器的数量合理。在连续降雨条件下,降雨量和降雨强度越大,穿透雨量越大,且穿透雨率也在增加(图 3,表 1—2),与以往研究结果相同^[14-15,9-10]。从表 1—2 中可以看出,穿透雨在降雨中所占的比例最高,各别降雨事件中,穿透雨要远远大于降雨量,如 7 月 16 日,两林分穿透雨量均大于降雨量。图 3 中可以看出,穿透雨

与降雨量之间存在很好的线性相关关系($y=ax+b$),从线性方程拟合系数 a 值来看,辽东栎林穿透雨占降雨量的 86%,刺槐林穿透雨占降雨量的 89%,两样地穿透雨与降雨量的线性方程具体可表达为,辽东栎: $P_{TQ}=0.86P+1.42(R^2=0.99,p<0.0001)$,刺槐: $P_{TR}=0.86P+1.42(R^2=0.9986,p<0.0001)$ 。表明,在连续降雨条件下,线性方程同样适用于该地区两典型林分穿透雨与总降雨之间的关系。巩合德等^[14]在监测了穿透雨与降雨量之间的几何回归模型

表 2 刺槐林各降雨事件中各分量的监测数据及比例

降雨事件	日期	降雨量/ mm	穿透雨/ mm	穿透 率/%	树干 流/mm	树干流 比例/%	树冠 截留/mm	树冠截 留率/%
1	07-03	44.6	41.68	93	2.70	6	0.23	0.51
2	07-09	80.2	72.68	91	5.25	7	2.27	2.8
3	07-10	11.8	11.49	97	0.78	7	-0.47	-3.98
4	07-12	68.8	60.54	88	4.83	7	3.43	4.99
5	07-14	27.8	28.72	103	2.24	8	-3.16	-11.37
6	07-15	9.6	8.57	89	0.45	5	0.58	6.04
7	07-16	4	4.81	120	0.07	2	0.02	0.50
8	07-19	46	41.15	89	1.13	2	3.72	8.09
9	07-24	112.2	99.27	89	5.91	5	7.02	6.31
10	07-25	96	85.82	89	7.36	8	-6.99	-7.28

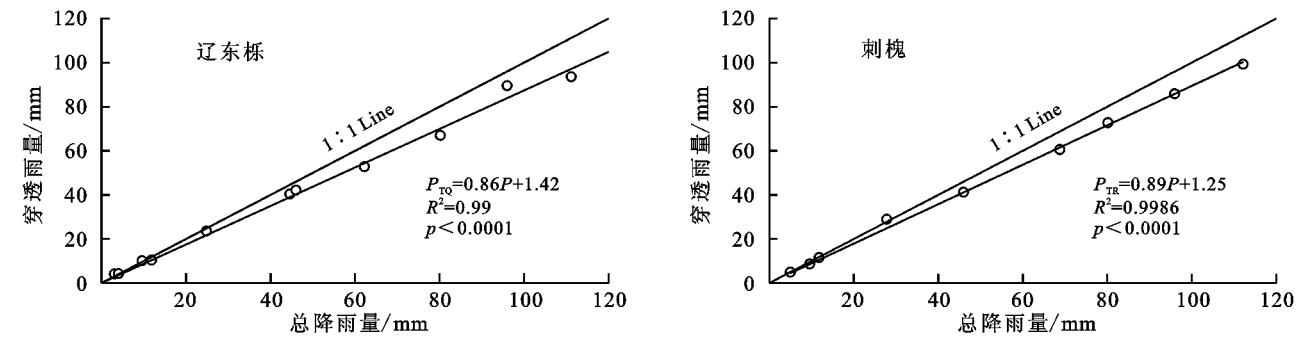


图 3 两典型林分穿透雨与降雨量关系

2.3 树干流

对于单次降雨事件来说,由于森林生态系统林冠层对大气降水的重新分配作用,当大气降水发生时,降水首先会被树冠的枝叶、枝皮和树干所截留(林冠截留降水),其次一部分降雨通过树枝、叶尖滴落或由林间空隙(林窗)直接降落到林地上,形成林内降雨(林内穿透雨),最后一部分降雨沿着树干到达地面,才形成树干流。

相对于穿透雨,茎流出现的时间更滞后,几乎是穿透雨所需时间的 2 倍^[17]。因而在林冠的降雨分配中树干流一般所占的比重很小,在有的研究中树干流甚至被忽略不计。然而连续降雨条件下,树冠截留和树皮均处于饱和状态,此时树干流占降雨量的比例会显著增加。由表 1—2 可以看出,连续降雨条件下,树干流在降雨中所占的比例比较稳定,辽东栎林实测树

后发现,线性回归方程适用于川西亚高山冷云杉林穿透雨与总降雨量之间的关系。李振新等^[16]对岷江流域冷杉针叶林的穿透降雨空间分布特征研究发现,穿透降雨与林外降雨量之间的关系符合 Logistic 曲线。本文由于是连续降雨条件下进行监测,测定期间树皮和林冠层基本处于充分润湿状态,因而,穿透雨与降雨量之间存在线性方程,但也不排除单个穿透雨收集器获得的穿透雨量与降雨量之间存在指数增长关系的可能。

干流占降雨量的比例为 15%左右,刺槐林实测树干流占降雨量的比例为 7%左右,本文树干流所占降雨量比例在王佑民^[18]研究范围之内,他通过总结了我国主要林区的树干流特点发现,树干流占林冠层截留量的比例多则至 15%,少则至 1%。这主要是由于树干流的大小受树种、降雨量、树皮粗糙度、树枝分枝特点及胸径大小等影响^[19]。

将每次降雨事件之后树干流的均值与胸径进行线性回归,由图 4 可以看出,辽东栎树干流与胸径之间存在极显著的线性正相关关系。从辽东栎和刺槐树干流误差来看,树干流误差随着辽东栎胸径的增大而变大;随刺槐胸径的增大,误差变小。这与两种树种的林冠冠幅和分枝有关,辽东栎生长良好,冠层丰富,分枝较多;而刺槐林内大部分树木普遍出现枯梢现象^[20],尤其是胸径较大的样树,胸径较小的刺槐冠

层发育良好。通常认为树干流随径级和冠幅的增大而增大。Pressland 等研究表明,在不同降雨强度下,树干胸径与树干流之间存在正相关关系。万师强等^[22]研究也表明,树木的平均树干流随径级和冠幅

的增大而增大。胸径和树干流的相关性为基础的方法是计算林地径流的最好的方法^[19]。也有研究表明,由于树冠结构的不同,有些胸径和冠幅较大的树木,树干流反而较小^[17-19,22-23]。

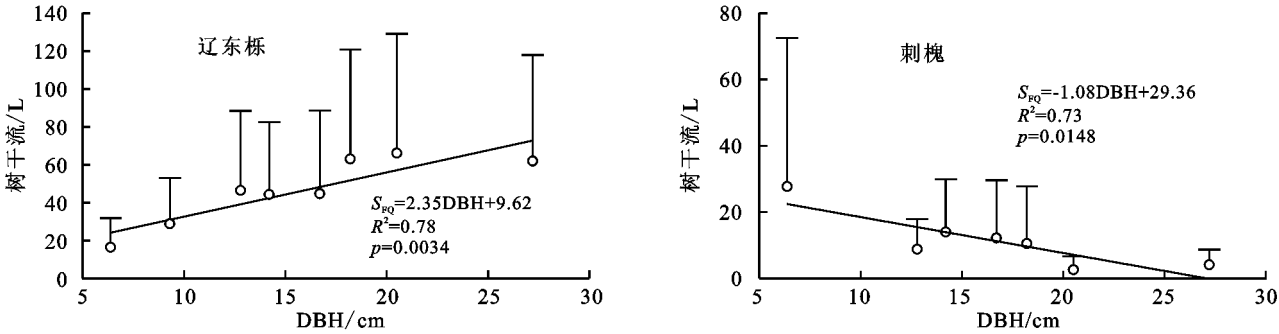


图 4 两树种树干流与相应胸径之间的关系

林分树干流与降雨量之间的关系见图 5,林分树干流与降雨量之间存在极显著的线性相关关系。本文的研究与多数研究一致,即树干流与降雨量的关系为直线相关。王彦辉^[24]研究毛竹树干流与降雨量之间可以表达为 $S_F=-0.07P+0.049$ 。Huber 等^[9]对针叶树和阔叶树树干流的研究表明,针叶树和阔叶树林分树干流与总降雨量之间存在显著的线性相关。Staelens 等^[25]对山毛榉林树干流研究表明,树干流与降雨量之间存在极显著线性相关。Marin 等^[26]

对 4 个森林生态系统降雨分配研究表明,尽管树干流占总降雨量的比例较小,但与降雨量之间存在指数关系。线性方程拟合系数来看,辽东栎林树干流总量占到降雨量的 14%,而刺槐林树干流仅占到降雨量的 6%;线性方程常数项来看,辽东栎常数为正,刺槐常数为负,表明辽东栎林树干流出现的临界降雨量要小于刺槐树干流出现的降雨量,这可能与两树种树冠冠幅和分枝数量以及树干高度、树皮吸水性有关。

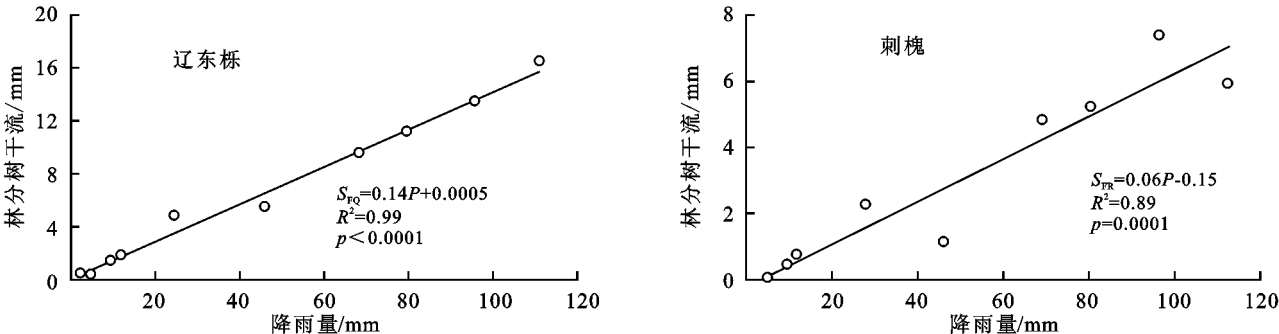


图 5 两典型林分树干流与降雨量之间的关系

2.4 林冠截留

林冠截留在森林生态系统水文循环和水量平衡中占有极其重要的地位,主要受到降雨特征、树冠特征、树种组成、林冠特征、雨前林冠的湿润程度、风速等多种因素的影响。刘世荣等^[27]总结了地跨我国南北不同气候带的各种森林类型的林冠截留率,表明,截留率变动范围在 11.4%~34.3%,变动系数为 6.68%~55.05%,其中以亚热带西部高山常绿针叶林最大,亚热带山地常绿落叶阔叶混交林最小^[28]。以上研究结论均基于长期非连续降雨条件下的观测结果。然而,在连续降雨情况下,冠层截留与降雨量存在负相关关系^[6]。Rutter 等^[7]研究表明,在连续降雨事件中,总降雨量与净降雨量(林内降雨,即树干流和穿透雨之和)的线性关系截距为负值,即冠层截留

为负值。这与本研究连续降雨条件下,两林分林冠截留均出现负值相符(表 1—2)。辽东栎林冠截留在连续降雨事件,如降雨事件 2 和降雨事件 24 之后,林冠截留均为负值,同时由穿透雨和树干流所占降雨量的比例来看(图 3、图 5),辽东栎林两者所占比例为 100%(86%+14%),也就是说,在连续降雨条件下,林分冠层截留基本为零;刺槐人工林林冠截留量的变化情况则变异较大,无明显规律,刺槐人工林穿透雨(图 3)和树干流(图 5)占降雨量的比例为 95%(89%+6%),由表 2 也可以看出,刺槐冠层截留大部分情况下出现正值情况,但这并不是真正的刺槐林冠截留,可能与穿透雨测定值偏小有关。由于该地区刺槐人工林经常受到土壤干旱胁迫的影响,出现严重的枯梢现象^[29-31],为该地区林下灌木提供了足够的生长空间,该区灌木长势

较好,且普遍较高。测定刺槐林地的穿透雨可能经过灌木冠层的二次分配作用,也就是说,监测的刺槐林分穿透雨变成了降雨经过两次冠层分配作用后的穿透雨,因而数值变小。陈云明等^[32]研究表明,7~10 a沙棘灌木林冠截留率变化为6.9%~9.8%,平均为8.5%。霍竹等^[33]研究表明,沙柳灌木林冠截留率平均为13.2%,柠条林冠截留率平均为14.3%。

连续降雨条件下,由于林冠截留量的容量基本接近于零或为负值,也就意味着近乎全部的降雨以穿透雨和树干流的形式进入林内,对于特定样地来说,林内的枯落物和土壤的含水量成为减少地表径流量的关键因素。相同雨强条件下,人工刺槐林地表径流是辽东栎次生林地表径流的4~6倍(未发表数据),这主要是由于两林分的枯落物差异所致。另一方面,由于土壤含水量达到饱和,加之黄土高原土壤土质疏松,在边坡时常有塌方的出现。因此在以后的植被修复措施和工程施工措施的建设中,要采取工程措施稳固坡面结构和植被措施恢复生态相结合的方法,尤其是公路边坡的防护方面。

3 结论

连续降雨条件下,两典型森林群落穿透雨和树干流与降雨量之间存在显著的正相关关系。辽东栎林分穿透雨占降雨量的86%,刺槐林分穿透雨占降雨量的89%。辽东栎单株树干流与胸径之间存在显著正相关性关系。辽东栎林分树干流占降雨量的14%,刺槐林分树干流占降雨量的6%。辽东栎林树干流所占比例和穿透雨所占比例之和与降雨量相等,表明该林分在连续降雨条件下,树冠截流为零或负值;刺槐树干流和穿透雨所占比例之和略小于降雨量,这可能与该林分灌木的冠层截留和树干流有关。本文降雨分配的研究是基于连续降雨情况下,林冠截留、树皮吸水基本处于充分润湿状态,是一种较为理想状态,然而对于年内或年际非连续降雨情况下的分配,尤其是林冠层截留的研究有待进一步解决,同时为进一步分析比较连续降雨和间隔降雨条件下,不同森林生态系统森林水文过程提供坚实的数据支撑和理论依据。

参考文献:

- [1] 王爱娟,章文波. 林冠截留降雨研究综述[J]. 水土保持研究,2009,16(4):55-59.
- [2] 胡珊珊,于静洁,胡堃,等. 华北石质山区油松林对降水再分配过程的影响[J]. 生态学报,2010,30(7):1751-1757.
- [3] Link T E, Unsworth M, Marks D. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124 (3):171-191.
- [4] Rutter A J, Morton A J. A predictive model of rainfall

interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables[J]. Journal of Applied Ecology, 1977,14(2):567-588.

- [5] Zeng N, Shuttleworth J W, Gash J H C. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis[J]. Journal of Hydrology, 2000,228 (3):228-241.
- [6] Leyton L, Reynolds E R C, Thompson F B. Rainfall interception in forest and moorland[C]// International Symposium on Forest Hydrology. New York, USA: Pergamon Press, 1967.
- [7] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, et al. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine[J]. Agricultural Meteorology, 1972,9 (71):367-384.
- [8] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia; IV The relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of these forests, and the effect on interception of thinning the pine plantation[J]. Hydrological Processes, 1990,4(2):169-188.
- [9] Huber A, Iroumé A. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile[J]. Journal of Hydrology, 2001,248(1):78-92.
- [10] Siles P, Vaast P, Dreyer E, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss in a coffee(*Coffea arabica* L.) monoculture compared to an agroforestry system with *Inga densiflora*[J]. Journal of Hydrology, 2010,395(1):39-48.
- [11] 华夏. 延安遭遇百年一遇强降雨,聚焦救灾一线[N/OL]. 新华网,2013-07-16. http://news.xinhuanet.com/photo/2013-07/16/c_125015130.htm
- [12] Rodrigo A, Avila A. Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forests[J]. Journal of Hydrology, 2001,243 (3):216-227.
- [13] He Z B, Yang J J, Du J, et al. Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2014,188(2):58-63.
- [14] 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.
- [15] 曾杰,郭景唐. 太岳山油松人工林生态系统降雨的第一次分配[J]. 北京林业大学学报,1997,19(3):21-27.
- [16] 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[J]. 生态学报,2004,24(5):1015-1021.
- [17] 陈书军,陈存根,张硕新,等. 秦岭天然次生油松林冠层对降雨的截留特征及延滞效应[J]生态学报,2011,32 (4):1-9.

参考文献:

- [1] 农宇,王坤,杜清运. 利用对分类 Logistic 回归进行土地利用变化模拟:以湖北省嘉鱼县为例[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(6):743-746.
- [2] 谢花林. 典型农牧交错区土地利用变化驱动力分析[J]. 农业工程学报,2008,24(10):56-62.
- [3] 谢花林. 基于 Logistic 回归模型的区域生态用地演变影响因素分析:以京津冀地区为例[J]. 资源科学,2011,33(11):2063-2070.
- [4] 曾凌云,王钧,王红亚. 基于 GIS 和 Logistic 回归模型的北京山区耕地变化分析与模拟[J]. 北京大学学报:自然科学版,2009,45(1):165-170.
- [5] Fox J, Vogler J B, Sen O L, et al. Simulating land-cover change in montane mainland southeast Asia[J]. Environmental Management, 2012,49(5):968-979.
- [6] Santini M, Valentini R. Predicting hot-spots of land use changes in Italy by ensemble forecasting[J]. Regional Environmental Change, 2011,11(3):483-502.
- [7] Yu P S, Wang Y C, Kuo C C. Effects of land-use change on runoff response in the ungauged Ta-Chou basin, Taiwan [J]. International Association of Hydrological Sciences, Publication, 2003(279):162-170.
- [8] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual version 2000[Z]. Texas: Texas Water Resources Institute, College Station, 2002.
- [9] Arnold J G, Srinivasan P, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: Model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998,34(1):73-89.
- [10] 李占玲,徐宗学. 黑河流域上游山区径流模拟及模型评估[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3):344-349.
- [11] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model [J]. Environmental Management, 2002,30(3):391-405.
- [12] Verburg P H, Eickhout B, van Meijl H. A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use[J]. The Annals of Regional Science, 2008,42(1):57-77.
- [13] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [14] Gupta H V, Sorooshian S, Yapo P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999,4(2):135-143.
- [15] Pontius R G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(8): 1011-1016.
- [18] 王佑民. 中国林地水土保持功能研究概况[J]. 水土保持学报,2000,14(4):109-113.
- [19] Hanchi A, Rapp M. Stemflow determination in forest stands[J]. Forest Ecology and Management, 1997,97(3):231-235.
- [20] Wang Y L, Liu G B, Kume T, et al. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China[J]. Journal of Forest Research, 2010,15(4):241-251.
- [21] Pressland A J. Rainfall partitioning by an arid woodland (*Acacia aneura* F. Muell.) in south-western Queensland[J]. Australian Journal of Botany, 1973,21(2):235-245.
- [22] 万师强,陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流[J]. 生态学报,2000,20(1):61-67.
- [23] 董世仁,郭景. 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.
- [24] 王彦辉. 陇东黄土地区刺槐林水土保持效益的定量研究[J]. 北京林业大学学报,1986,8(1):35-52.
- [25] Staelens J, De Schrijver A, Verheyen K, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology [J]. Hydrological Processes, 2008,22(1):33-45.
- [26] 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.
- [27] 刘世荣,温远光,王兵,等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京:中国林业出版社,1996.
- [28] 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.
- [29] 侯庆春,韩蕊莲,韩仕锋. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探[J]. 中国水土保持,1999(5):11-14.
- [30] 王力,邵明安,李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究[J]. 林业科学,2004,40(1):84-91.
- [31] 王力,邵明安,侯庆春,等. 延安试区人工刺槐林地的土壤干层分析[J]. 西北植物学报,2001,21(1):101-106.
- [32] 陈云明,陈永勤. 人工沙棘林水文水土保持作用机理研究[J]. 西北植物学报,2003,23(8):1357-1361.
- [33] 霍竹,邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带降水及灌木林冠截留特性研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(5):88-92.

(上接第 163 页)