

黄土丘陵区2种典型林分降雨分配特征及其主要影响因素

王淑春^{1,2}, 程然然³, 杜盛^{2,4}

(1.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学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;3.景德镇学院,江西 景德镇 333000;4.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: 森林对降雨的分配是森林生态水文和生物地球化学循环中的重要过程之一。通过对黄土丘陵区2种典型林分(刺槐林和辽东栎林)生长季降雨分配过程的实地监测,探究2种林分的降雨分配特征及其主要影响因素。结果表明:试验期间,刺槐林和辽东栎林降雨分配各组分均表现为穿透雨量(325.0,295.1 mm) > 冠层截留量(39.8,73.6 mm) > 树干径流量(25.8,21.9 mm),同时穿透雨率(83.2%和75.6%) > 冠层截留率(10.2%和18.8%) > 树干径流率(6.6%和5.6%)。次降雨量是影响降雨分配的关键因子,穿透雨量和树干径流量与次降雨量间呈现极显著线性关系,冠层截留量与次降雨量间呈现极显著对数函数关系;穿透雨率和树干径流率与次降雨量间呈现显著对数函数关系,冠层截留率与次降雨量间呈现极显著指数函数关系。刺槐林和辽东栎林产生穿透雨的次降雨阈值分别为1.0,1.3 mm,产生树干径流的次降雨阈值分别为5.9,5.4 mm。刺槐林产生的穿透雨量和树干径流量均大于辽东栎林,而冠层截留量小于辽东栎林。研究结果为黄土丘陵区森林生态水文过程的研究提供基础数据,对该地区植被恢复过程中植被类型的选择具有指导意义。

关键词: 刺槐林; 辽东栎林; 穿透雨; 冠层截留; 树干径流; 黄土丘陵区

中图分类号:S715.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)03-0173-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.025

Characteristics and Main Influencing Factors of Rainfall Partitioning in Two Typical Forests in the Loess Hilly Region

WANG Shuchun^{1,2}, CHENG Ranran³, DU Sheng^{2,4}

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100;3.Jingdezhen University, Jingdezhen, Jiangxi 333000; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Rainfall partitioning by forests is one of the important processes in forest eco-hydrological and biogeochemical cycles. In this study, the characteristics and main influencing factors of rainfall partitioning of two typical forest types (*Robinia pseudoacacia* plantation and *Quercus liaotungensis* natural secondary forest) were investigated by field monitoring during the growing season in the loess hilly region. The results showed that during the experiment, the components of rainfall partitioning in *R. pseudoacacia* plantation and *Q. liaotungensis* forest were in the order of throughfall (325.0 and 295.1 mm) > canopy interception (39.8 and 73.6 mm) > stemflow (25.8 and 21.9 mm), and throughfall rate (83.2% and 75.6%) > canopy interception rate (10.2% and 18.8%) > stemflow rate (6.6% and 5.6%). Rainfall amount was the key factor affecting rainfall partitioning. A highly significant linear relationship was observed between throughfall and stemflow and rainfall amount, while the relationship between canopy interception and rainfall amount exhibited a highly significant logarithmic function. A significant logarithmic relationship existed between throughfall rate and stemflow rate and rainfall amount, while a highly significant exponential relationship was found between canopy interception rate and rainfall amount. Throughfall processed when rainfall exceeded 1.0 and 1.3 mm for *R. pseudoacacia* plantation and *Q. liaotungensis* forest, respectively. Stemflow processed when

收稿日期:2021-11-19

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504601)

第一作者:王淑春(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事植被恢复与生态水文研究。E-mail:shuchun.wang329@qq.com

通信作者:杜盛(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事植被恢复与生态水文研究。E-mail:shengdu@ms.iswc.ac.cn

rainfall exceeded 5.9 and 5.4 mm for *R. pseudoacacia* plantation and *Q. liaotungensis* forest, respectively. The throughfall and stemflow generated by *R. pseudoacacia* plantation were larger than that of *Q. liaotungensis* forest, while the canopy interception was smaller than that of *Q. liaotungensis* forest. This study provides basic data for the research of eco-hydrological processes in the loess hilly region, and has guiding significance for the selection of vegetation types in the process of vegetation restoration in this area.

Keywords: *Robinia pseudoacacia* plantation; *Quercus liaotungensis* forest; throughfall; canopy interception; stemflow; loess hilly region

在干旱半干旱的黄土高原地区,植被恢复和林业生产活动中首先要面对的是森林与水的关系问题^[1]。土壤层深厚是黄土高原的主要特征,地下水位远超植被根系的吸收范围,降雨是该地区植被用水和土壤水分补充的唯一来源。因此,森林对降雨的分配也成为该地区生态学和 hydrology 领域关注的热点之一。

在降雨过程中,森林冠层是雨水接触的第一界面^[2]。降雨经过森林冠层的分配成为穿透雨、冠层截留以及树干径流 3 个部分,这一过程是森林作用于森林水循环的第一个重要过程^[3]。森林植被层的截留过程可以缓冲并削弱降雨动能^[4]、延长降雨进程^[5]并改变原有的降雨空间分布格局^[6],该过程对森林水文循环和水土保持具有重要意义。

穿透雨是降雨分配的最大组分,在森林生态系统的水文循环和生物地球化学循环中发挥着重要作用^[7]。降雨过程中和降雨后被森林冠层截留并随后蒸发的降水组分是冠层截留^[8],该组分不参与森林内部的水分循环,但属于森林生态系统蒸散发的重要组分^[9]。降雨输入森林生态系统的另一个路径是树干径流,它将水分以及淋溶物质输入到树木根部附近的土壤中,为林分提供水分以及营养物质^[10]。影响降雨分配的因素较多,包括林分因素(森林类型、林分组成和林分结构等)、气候因素(降雨量、降雨强度和温度等)以及土壤因素(土壤类型和质地)等^[2,11]。近年来,关于我国东北等地区典型针阔叶森林生态系统对降雨分配的研究有较多报道^[9,12-15],对于黄土丘陵区天然次生林和水土保持人工林的降雨分配特征仍有待较为深入的定位观测和分析。此外,黄土丘陵区植被与水资源的供求矛盾也越来越引起学者们的关注^[16-17]。由于黄土高原土层深厚,地下水位深,降雨是林地土壤唯一的水分补充途径^[17-18],对黄土高原森林降雨分配特征的研究具有更加独特的意义。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是黄土丘陵区主要的水土保持造林树种,辽东栎(*Quercus liaotungensis*)是典型的乡土树种。本试验通过对延安市南郊公路山 2 种典型林分降雨分配的观测,分析 2 种林分内降雨分配特征及其影响因子,为阐明该地区典型森林植被的水资源分配特征提供基础资料,也为森林植

被恢复的合理规划提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市南郊公路山林区(36°25.40'N,109°31.53'E),海拔 1 245~1 395 m,地属黄土丘陵区。延安市气象台近 37 年(1981—2017 年)的统计资料显示,延安市(36°36'N,109°30'E)平均年降水量约 511.6 mm,年平均气温 10.2 °C(图 1)。延安地区气候类型为暖温带半干旱大陆性季风气候,冬春季寒冷干燥,夏秋季温暖多雨^[19]。生长季(4—10 月)降水约占全年降水量的 91%。

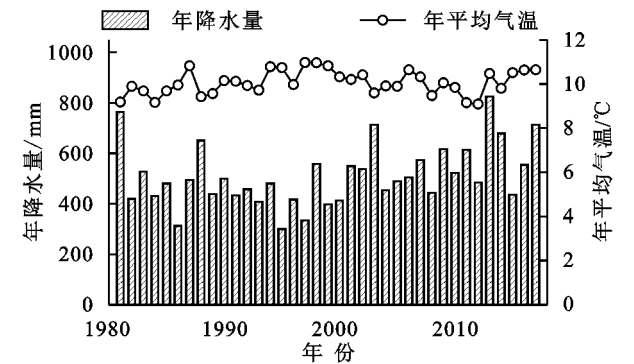


图 1 延安市 1981—2017 年间年降水量及平均气温变化

本试验以研究区内典型刺槐人工林(简称刺槐林)和辽东栎天然次生林(简称辽东栎林)为研究对象,在 2 种林分内各设置 1 处规格为 20 m×20 m 的固定监测样地,其中,刺槐林固定监测样地海拔 1 350 m,坡度 26°,坡向东南,样地优势树种为刺槐,伴生植物包括黄蔷薇(*Rosa hugonis*)等灌木。辽东栎林固定监测样地海拔 1 360 m,坡度 22°,坡向西,样地优势树种为辽东栎和山杏(*Prunus sibirica*),伴生植物包括侧柏(*Platycladus orientalis*)、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)、桃叶卫矛(*Euonymus maackii*)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等灌木。2 种林分植被特征见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 基础气象要素监测 在样地附近的空旷处设置多功能简易气象站,连续实时监测研究区基础气象要素(如太阳总辐射(R_s , W/m²)、空气温度(°C)、空

气相对湿度($RH, \%$)以及降雨量(P, mm)等)。降雨量(P, mm)的测定采用翻斗式自计雨量计(Davis Rain collector II model 7852, Davis Instruments,

USA),雨量计水平安装于地面 50 cm 高度,且上方无明显遮挡。本研究的降雨分配研究以该站监测的降雨事件为基准。

表 1 2 种林分植被特征信息

林分类型	平均树高/m	平均胸径/cm	冠幅半径/m	郁闭度	乔木密度/(株·hm ⁻²)	林龄/a
刺槐林	8.6±1.8	9.8±0.3	0.6~1.3	0.75	3100	40
辽东栎林	5.6±2.2	10.2±6.1	0.9~3.2	0.80	1350	60

注:平均树高和平均胸径的数值为平均值±标准差。

1.2.2 穿透雨(throughfall, TF)观测 本试验于 2017 年 7—10 月于样地内具有代表性的地段均匀布设 25 个点(1 m 间隔)放置穿透雨采集桶(直径为 17 cm 的塑料漏斗+容积为 6 L 的集水桶)。对个别雨量筒正上方 2 m 内有灌木枝叶的予以剪除,以保证测量结果更具有代表性。每次降雨事件后尽快测量每个集水桶内收集到的雨量,测量精度 $<5 \text{ mL}$ 。样地穿透雨量(mm)计算公式为:

$$TF = \frac{10}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{S_i}$$
 (1)

式中: V_i 为第 i 个穿透雨采集桶收集到的降雨体积(mL); S_i 为漏斗面积(cm^2); n 为穿透雨采集桶的数量。

1.2.3 树干径流(stemflow, SF)观测 根据每木检尺得到的树木径级分布,在不同径级中选取代表性样树进行观测。其中,辽东栎样地观测样树共 12 株,刺槐样地内 14 株。对每株样树采用包裹式集水法收集树干径流,将其导入集水桶中,保证在整个收集过程中树干径流无损失。每场降雨过后尽快用量筒测定集水量,按照公式计量获得整个样地的树干径流量(mm)。

$$SF = \frac{1}{1000n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i * BA}{S_i}$$
 (2)

式中: C_i 为第 i 株样树的树干径流收集量(mL); BA 为整个样地的胸高断面积(m^2/hm^2); S_i 为第 i 株样树的胸高断面积(cm^2);本研究中辽东栎和刺槐样地的 BA 值分别为 $24.36, 32.04 \text{ m}^2/\text{hm}^2$ 。

1.2.4 冠层截留(interception, I)计算 根据水量平衡公式,冠层截留量为林外降雨量与穿透雨量和树干径流量的差值,具体计算公式为:

$$I = P - SF - TF$$
 (3)

式中: I 为冠层截留量(mm); P 为林外气象站测得的降雨量(mm); SF 为树干径流量(mm); TF 为穿透雨量(mm)。

各降雨组分与林外降雨量的比值为该组分的比率,即穿透雨率、树干径流率和冠层截留率。

1.2.5 数据处理 对所取得的数据采用 Excel 2019 软件进行整理和初步分析后,利用 SPSS 26.0 软件进行回归分析及显著性检验,采用 SigmaPlot 14.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 试验期间降雨分布特征

在试验期间(2017 年 7—10 月),样地实测降雨量为 509 mm,约占当年总降雨量(713.2 mm)的 71.4%。试验期间共监测到降雨事件 19 场,取观测期间降雨量 $>2 \text{ mm}$ 的 18 场有效降雨^[8]进行分析可得,总降雨量为 390.6 mm,单次降雨事件中最大降雨量为 64.0 mm,最小降雨量为 2.6 mm,平均降雨量为 21.7 mm,最大降雨强度为 5.7 mm/h,最小降雨强度为 0.3 mm/h,平均降雨强度为 2.2 mm/h(图 2)。按照国家气象局颁布的降水强度等级划分标准进行划分,18 场有效降雨中出现小雨($0.1 \sim 9.9 \text{ mm}$)、中雨($10.0 \sim 24.9 \text{ mm}$)、大雨($25.0 \sim 49.9 \text{ mm}$)以及暴雨($50.0 \sim 99.9 \text{ mm}$)的次数分别为 7,5,3,3 次,分别占总降雨次数的 38.9%,27.8%,16.7%和 16.6%,雨量等级以小雨和中雨为主。

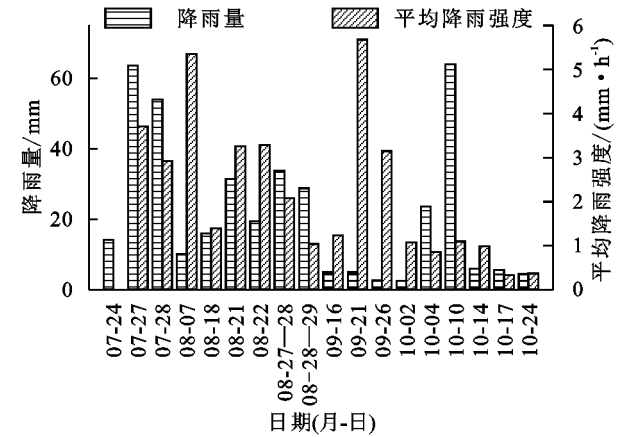


图 2 试验期间各降雨事件的降雨量和平均降雨强度

2.2 试验期间降雨分配特征

试验期间刺槐林和辽东栎林单次的穿透雨量分别为 1.5~56.2, 1.4~52.4 mm,冠层截留量分别为 0.8~5.5, 1.2~10.5 mm,树干径流量分别为 0.2~5.2, 0.3~4.6 mm(图 3)。2 种林分降雨分配规律均呈现为穿透雨量 $>$ 冠层截留量 $>$ 树干径流量(图 4)。研究时段内,刺槐林的穿透雨总量(325.0 mm)和穿透雨率(83.2%)均大于辽东栎林(分别为 295.1 mm 和 75.6%);而辽东栎林的冠层截留总量(73.6 mm)

和冠层截留率(18.8%)均大于刺槐林(分别为 39.8 mm 和 10.2%);刺槐林的树干径流总量(25.8 mm)和树干径流率(6.6%)略大于辽东栎林(分别为 21.9 mm 和 5.6%)。

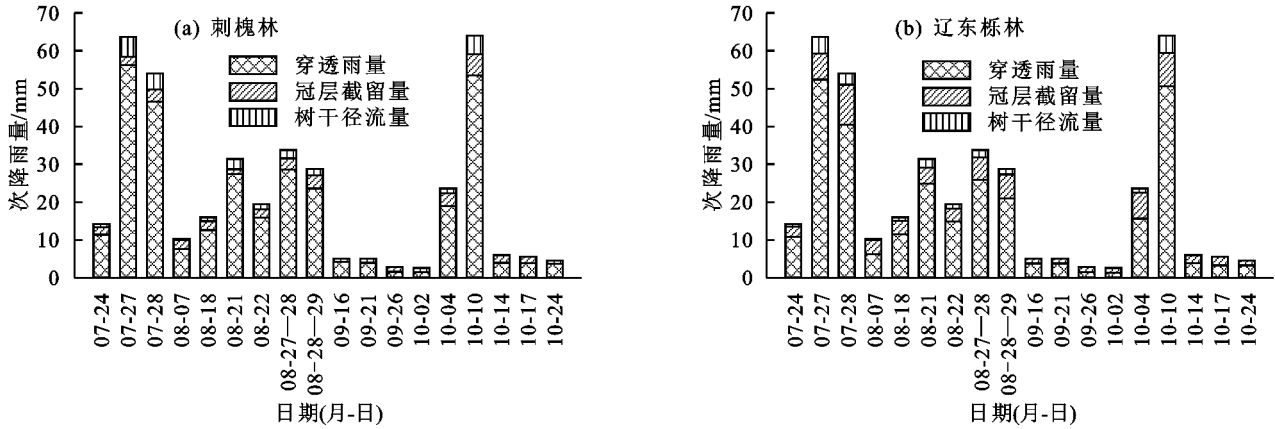


图 3 试验期间刺槐林和辽东栎林单次降雨分配特征

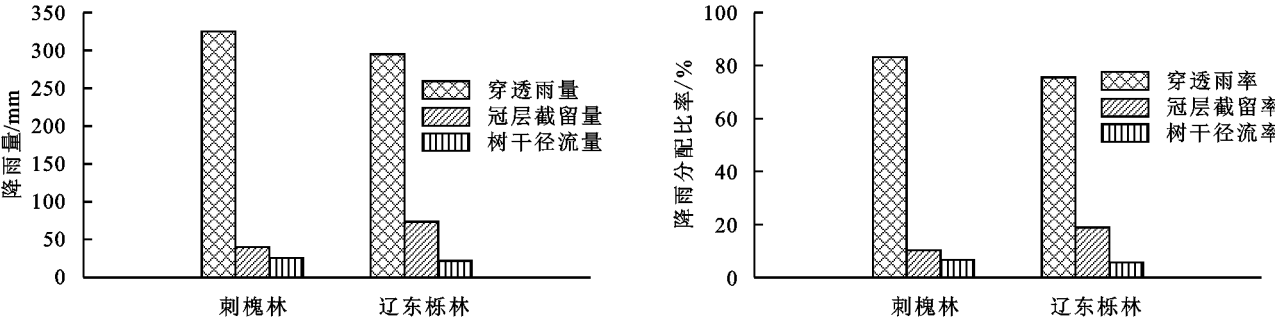


图 4 试验期间 2 种林分降雨分配特征及各组分比率

2.3 次降雨量和平均降雨强度对 2 种林分降雨分配的影响

2.3.1 次降雨量对穿透雨分配的影响 由降雨分配数据可得,刺槐林单次降雨穿透雨率为 56.1%~88.4%,平均单次降雨穿透雨率为 77.7%±9.3%;辽东栎林单次降雨穿透雨率的范围在 51.9%~82.4%,均值为 70.4%±8.9%。

刺槐林以及辽东栎林的穿透雨量和穿透雨率均随着次降雨量的增加而增加,呈现极显著相关关系

($P<0.01$)。从图 5 可以看出,刺槐林穿透雨量随次降雨量增加的增幅略大于辽东栎林,即相较于辽东栎林,刺槐林随着次降雨量增加能够产生更多的穿透雨。刺槐林能够产生穿透雨的次降雨阈值约为 1.0 mm,辽东栎林能够产生穿透雨的次降雨阈值约为 1.3 mm。2 种林分穿透雨率与次降雨量的关系呈现极显著对数相关关系($P<0.01$)。随着次降雨量增加,2 种林分穿透雨率呈现先增加后逐渐趋于平稳的趋势,刺槐林的穿透雨率高于辽东栎林。

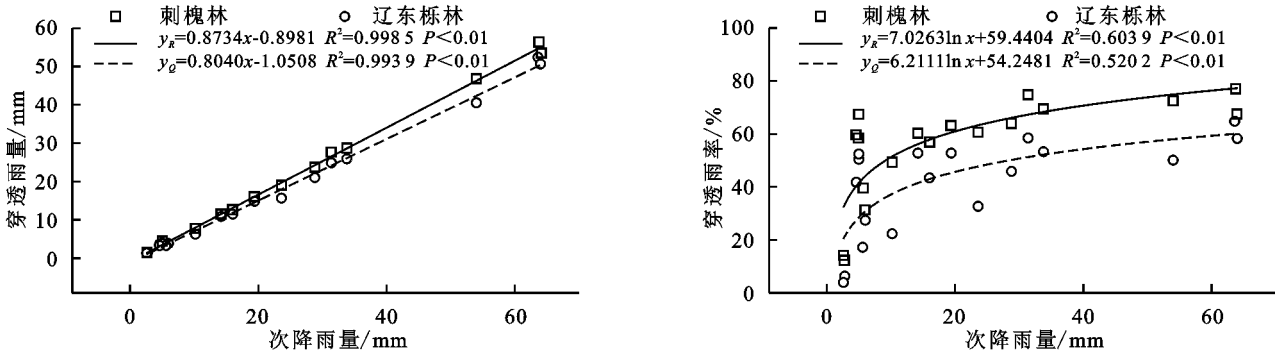


图 5 2 种林分穿透雨量及其比率与次降雨量的关系

2.3.2 次降雨量对冠层截留分配的影响 由降雨分配数据可知,刺槐林单次降雨的冠层截留率为 3.4%~43.9%,平均单次降雨冠层截留率为 18.3%±12.0%;辽东栎林单次降雨冠层截留率为 10.7%~48.1%,均值为 26.2%±11.1%。从图 6 可以看出,在次降雨量相

同的情况下,辽东栎林的冠层截留量和冠层截留率均大于刺槐林。随着次降雨量的增加,2 种林分的冠层截留量以对数函数形式不断增加后缓慢趋于稳定($P<0.01$),冠层截留率则随着次降雨量的增加以指数函数形式单调递减,最后趋于稳定($P<0.01$)。

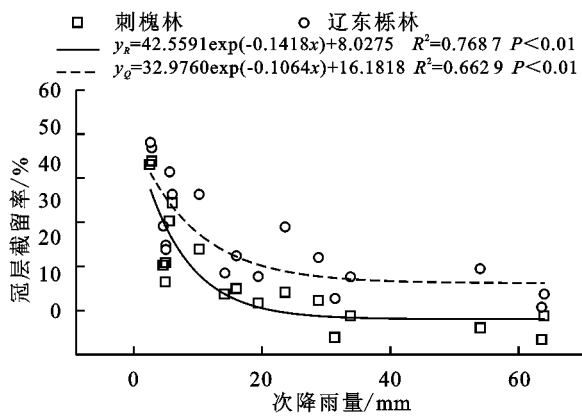
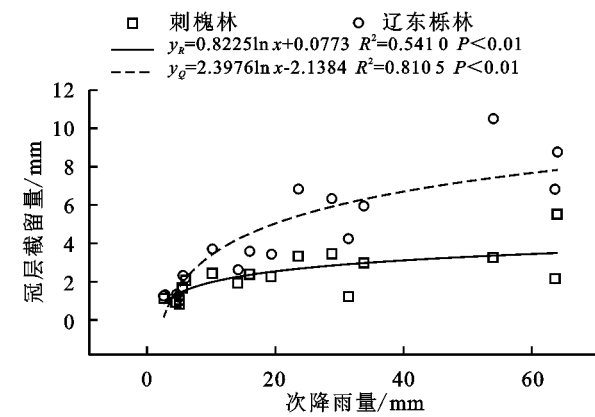


图 6 2 种林分冠层截留量及其比率与次降雨量的关系

2.3.3 次降雨量对树干径流分配的影响 由降雨分配数据可得,刺槐林单次降雨的树干径流率为 1.5%~8.7%,平均单次降雨树干径流率为 6.5%±1.8%;辽东栎林单次降雨树干径流率为 2.6%~7.3%,均值为 5.6%±1.3%。从图 7 可以看出,2 种林分的树干径流量和树干径流率均随着次降雨量的增加而增加,树干径流量与次降雨量之间呈现极显著线性正相关关系($P<0.01$)。在次降雨量相同的情况下,刺槐林的树干径流量大于辽东栎林。对

拟合直线斜率分析可得,随着次降雨量的增加,刺槐林产生树干径流的速率大于辽东栎林。据方程推算,当次降雨量分别达到 5.9,5.4 mm 后,刺槐林和辽东栎林开始产生树干径流。2 种林分的树干径流率与次降雨量之间呈现显著相关(对数函数关系)($P<0.05$),随着次降雨量增加,树干径流率逐渐增加,当次降雨量增加到一定程度时增速逐渐缓慢。在次降雨量相同的情况下,刺槐林的树干径流率大于辽东栎林。

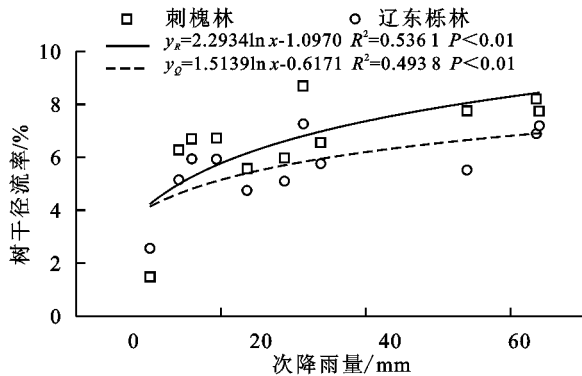
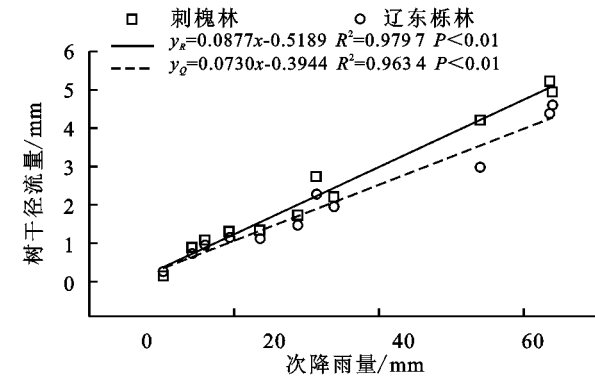


图 7 2 种林分树干径流量及其比率与次降雨量的关系

2.3.4 降雨分配各组分与次降雨量和平均降雨强度的相关性 由于植被冠层对降雨分配过程的复杂性,降雨分配过程受到多种因素的影响,如降雨特征、林内植物的形态学特征以及林地气候因素等。本研究中,无论是刺槐林还是辽东栎林,其降雨分配组分与次降雨量之间均呈现显著相关关系,而与平均降雨强度之间无明显相关关系(表 2)。

3 讨论

3.1 2 种林分降雨分配总体特征

通过对全国 8 个站点的降雨分配规律研究^[3]表明,穿透雨量占总降雨量的比例最大 69.3%±8.8%~84.4%±5.6%。通过对全国主要森林生态系统的水文功能进行比较^[20]得出,中国主要森林生态系统的冠层截留率为 11%~37%。本研究中,无论是刺槐林还是辽东栎林的穿透雨均为降雨分配过程的最大

组分(83.2%和 75.6%),符合上述规律,而刺槐林的冠层截留率(10.2%)略低于研究规律,这可能是地域、气候^[21]和林分条件^[22]等不同引起的差异。

地域差异会带来包括降雨量在内的气候、树种分布及其生长情况等差别,造成不同地区林内降雨分配特征的差异。此外,同一地区同一树种在不同发育状态下降雨分配特征也可能存在不同。通过对陕西省扶风县 2015 年和 2016 年生长季刺槐人工林的降雨分配特征研究^[23]表明,刺槐林穿透雨量、冠层截留量和树干径流量分别占总降雨量的 82.1%,16.3%和 1.6%。本研究刺槐林的穿透雨率与其相近,但树干径流率高于其均值,冠层截留率低于其均值。该差异可能是林分条件不同所致。本研究区刺槐林密度较高,且属于成熟林,林分生长趋于缓慢,存在较为严重的枯梢现象,这些因素可能导致刺槐林冠层拦截降雨能力下降。

3.2 2 种林分降雨分配各组分与次降雨量和平均降雨强度关系的差异

穿透雨是林地水分补充的主要来源^[24],与降雨量、林分类型以及林分冠层结构等因素有关^[2]。本研究得出,2 种林分的穿透雨量和穿透雨率均随着次降雨量的增加而增加,该结论佐证了前人^[12,25]的研究规律。受气候和林分等因素差异的影响,穿透雨量和穿透雨率与次降雨量的拟合方程在不同研究中有所差异,穿透雨量与次降雨量间的相关关系多为一次线性函数^[12,25-28]形式;穿透雨率与次降雨量间的拟合方程包括对数函数^[14,27]、幂函数^[15]以及二次多项式^[29]等形式。本研究中 2 种林分的穿透雨量与次降雨量间呈现线性关系,穿透雨率与次降雨量之间呈现对数函数关系。降雨条件相同时,相较于辽东栎林,刺槐林产生的穿透雨量更高。刺槐林产生穿透雨的次降雨阈值(1.0 mm)小于辽东栎林(1.3 mm),该结果与黄土高原刺槐人工林产生穿透雨的次降雨阈值(1.1 mm)^[23]和辽东半岛蒙古栎(*Quercus mongolica*)林产生穿透雨的次降雨阈值(2.0 mm)^[12]较为一致。Crockford 等^[2]的研究指出,林分条件中林冠大小、叶形、树枝分支角度和冠层间隙等因素均会影响穿透雨量以及降雨分配的效果。本研究中刺槐林冠幅半径(0.6~1.3 m)较辽东栎林(0.9~3.2 m)小,叶形较辽东栎小,枯梢现象严重等情况可能是刺槐林产生穿透雨量大于辽东栎林的原因。

表 2 2 种林分降雨分配各组分与降雨量和平均降雨强度的 Person 相关分析

林分	降雨分配组分	降雨量	平均降雨强度
刺槐林	穿透雨量	0.999 **	0.095
	穿透雨率	0.642 **	0.148
	冠层截留量	0.711 **	-0.167
	冠层截留率	-0.733 **	-0.140
	树干径流量	0.990 **	-0.094
	树干径流率	0.632 *	-0.359
	穿透雨量	0.998 **	0.094
辽东栎林	穿透雨率	0.633 **	0.198
	冠层截留量	0.902 **	-0.016
	冠层截留率	-0.719 **	-0.190
	树干径流量	0.982 **	-0.124
	树干径流率	0.628 *	-0.338

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

冠层截留的降水虽然未到达林地,但其仍是流域水量平衡的一个重要过程,研究冠层截留损失对于探究干旱半干旱地区的水文平衡过程具有重要意义^[30]。本研究得出,2 种林分冠层截留量与次降雨量之间呈现对数函数趋势,冠层截留率与次降雨量之间

呈现指数函数趋势,该趋势佐证了前人^[14,31-32]的研究规律,但由于林地气候特征、林分类型及植被结构等因素存在差异,最终拟合出的回归方程有所不同,其余拟合形式还包括二次函数^[12]、线性函数^[26]、和幂函数^[27]等形式。本研究发现,在次降雨量一定的情况下,辽东栎林的冠层截留大于刺槐林,这可能与 2 种林分冠层的发育程度有关。本研究中辽东栎林生长更新情况良好,冠层结构更为复杂,而刺槐林处于成熟林阶段,枯梢和细枝较多等情况可能导致冠层截留率低于辽东栎林。

树干径流是树干底部水分以及营养物质的空间局部化输入渠道^[24],通常比穿透雨营养更丰富^[33]。本研究刺槐林和辽东栎林的树干径流量与次降雨量之间均呈现线性正相关关系,树干径流率与次降雨量之间呈现对数函数关系,这与中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)灌丛的降雨分配研究^[27]以及缙云山 3 种典型森林降雨过程研究^[34]所得的结论一致。本研究中,刺槐林的树干径流总量略大于辽东栎林,刺槐林和辽东栎林产生树干径流的次降雨阈值分别为 5.9, 5.4 mm,该阈值高于西班牙东部处于有叶期的柔毛栎(*Quercus pubescens*)林^[26](4.3 mm)、黄土高原的刺槐人工林^[23](2.3 mm)和辽东半岛的蒙古栎林^[12](2.5 mm)。这可能与树种间林冠结构、树皮质地及枝干夹角等差异有关。刺槐冠层疏松、叶片柔软和具有托叶刺等特征有利于树干径流的形成。本研究中刺槐林的枯梢现象较为严重,不利于树冠集水以及树干径流的产生,因此所需的次降雨阈值较大。此外,虽然 2 种林分的树皮均为粗糙质地,但刺槐林树皮较辽东栎林浅。受干旱缺水等环境因素限制,刺槐树皮干枯剥裂等现象较为严重,较为光滑的剥裂处和线性的树皮沟槽等特征能够有效引导树干径流,辽东栎树皮重叠的褶皱在一定程度上抑制树干径流的产量,这些因素均可能导致刺槐林树干径流量以及产生树干径流所需的次降雨阈值略大于辽东栎林。

降雨强度也是影响降雨分配过程的重要因素^[14]。本研究分析了降雨分配各组分与平均降雨强度之间的相关关系,得出降雨分配各组分与平均降雨强度之间无显著相关关系。该结果出现的原因可能是本研究平均降雨强度范围较小(0.3~5.7 mm/h),次降雨间的平均雨强差异梯度小,因此未能与降雨分配各组分间呈现显著相关关系。在雨强梯度差异较大的研究中^[32],截留率与平均雨强之间存在显著关系。本研究中次降雨量范围为 2.6~64.0 mm,差异明显,呈现的规律也更明显。因此本研究中的降雨分配以次降雨量主导为主,平均降雨强度对降雨分配的作用不显著。

4 结论

(1)刺槐林和辽东栎林降雨分配规律均呈现为穿透雨量(325.0,295.1 mm) > 冠层截留量(39.8,73.6 mm) > 树干径流量(25.8,21.9 mm),穿透雨率(83.2%和75.6%) > 冠层截留率(10.2%和18.8%) > 树干径流率(6.6%和5.6%)。

(2)2种林分降雨分配各组分均受到次降雨量的显著影响,穿透雨量和树干径流量与次降雨量间呈现极显著线性关系,冠层截留量与次降雨量间呈现极显著对数函数关系;穿透雨率和树干径流率与次降雨量间呈现显著对数函数关系,冠层截留率与次降雨量间呈现极显著指数函数关系。刺槐林和辽东栎林产生穿透雨的次降雨阈值分别为1.0,1.3 mm,产生树干径流的阈值分别为5.9,5.4 mm。

(3)刺槐林产生的穿透雨量和树干径流量大于辽东栎林,而冠层截留量小于辽东栎林。

未来在黄土丘陵区进行造林规划和设计的过程中,应当将林分的降雨分配特征差异考虑在内,同时结合林分蒸腾以及蒸散等特点,合理选择树种,进行树种的科学配置。

参考文献:

- [1] 袁嘉祖,闵庆文.水是西北地区生态系统重建的根本[J].自然资源学报,2001,16(6):511-515.
- [2] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate[J].Hydrological Processes,2000,14:2903-2920.
- [3] Sun J M, Yu X X, Wang H N, et al. Effects of forest structure on hydrological processes in China[J].Journal of Hydrology,2018,561:187-199.
- [4] Nanko K, Onda Y, Ito A, et al. Variability of surface runoff generation and infiltration rate under a tree canopy: Indoor rainfall experiment using Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) [J]. Hydrological Processes, 2010,24(5):567-575.
- [5] Wei X, Bi H X, Liang W J. Factors controlling throughfall in a *Pinus tabulaeformis* forest in North China[J].Scientific Reports,2017,7:e14060.
- [6] Link T E, Unsworth M, Marks D. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest[J].Agricultural and Forest Meteorology,2004,124(3/4):171-191.
- [7] Nanko K, Onda Y, Ito A, et al. Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy[J].Agricultural and Forest Meteorology,2011,151(9):1173-1182.
- [8] Price A G, Carlyle-Moses D E. Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada[J].Agricultural and Forest Meteorology,2003,119(1/2):69-85.
- [9] 孙忠林,王传宽,王兴昌,等.2种温带落叶阔叶林降雨再分配格局及其影响因子[J].生态学报,2014,34(14):3978-3986.
- [10] Li X Y, Liu L Y, Gao S Y, et al. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semiarid loess region of China[J].Agricultural and Forest Meteorology,2008,148(10):1501-1507.
- [11] Van Stan J T, Siegert C M, Levia D F, 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.
- [12] 李连强,杨会侠,丁国泉,等.辽东半岛赤松和蒙古栎林降雨再分配特征及其相关性分析[J].北京林业大学学报,2020,42(11):47-55.
- [13] 凡国华,韩城,孙永涛,等.长三角地区马尾松林降雨再分配特征[J].西南农业学报,2019,32(2):422-428.
- [14] 万艳芳,刘贤德,王顺利,等.祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素[J].水土保持学报,2016,30(5):224-229.
- [15] 盛后财,蔡体久,俞正祥.大兴安岭北部兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 林下穿透雨空间分布特征[J].生态学报,2016,36(19):6266-6273.
- [16] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau[J].Agricultural and Forest Meteorology,2015,206:85-96.
- [17] 杨阳,朱元骏,安韶山.黄土高原生态水文过程研究进展[J].生态学报,2018,38(11):4052-4063.
- [18] Duan L X, Huang M B, Zhang L D. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China[J].Journal of Hydrology,2016,537:356-366.
- [19] 刘朋飞.黄土高原地区环境变迁与地质灾害关系研究[D].西安:长安大学,2010.
- [20] Liu S R, Sun P S, Wen Y G. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China[J].Chinese Journal of Plant Ecology,2003,27(1):16-22.
- [21] Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe[J]. Journal of Hydrology,2007,335(1/2):37-54.
- [22] Brauman K A, Freyberg D L, Daily G C. Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud inter-

- ception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(2): 265-275.
- [23] 马昌坤. 黄土高原人工刺槐林地生态水文过程研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [24] Barbier S, Balandier P, Gosselin F. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: A review[J]. Annals of Forest Science, 2009, 66(6): e602.
- [25] Dong L L, Han H R, Kang F F, et al. Rainfall partitioning in Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) stands at three different ages[J]. Forests, 2020, 11(2): e243.
- [26] Muzyło A, Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning in a deciduous forest plot in leafed and leafless periods[J]. Ecohydrology, 2012, 5(6): 759-767.
- [27] 田娜, 古君龙, 杨新国, 等. 中间锦鸡儿冠层降雨再分配特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 854-862.
- [28] Shachnovich Y, Berliner P R, Bar P. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(1/2): 168-177.
- [29] 邓文平, 郭锦荣, 邹芹, 等. 庐山日本柳杉林下穿透雨时空分布特征[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2428-2438.
- [30] Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58(2): 181-202.
- [31] 李衍青, 张铜会, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛降雨截留特征研究[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 267-272.
- [32] 刘章文, 陈仁升, 宋耀选, 等. 祁连山典型灌丛降雨截留特征[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1337-1346.
- [33] Su L, Zhao C M, Xu W T, et al. Hydrochemical fluxes in bulk precipitation, throughfall, and stemflow in a mixed evergreen and deciduous broadleaved forest[J]. Forests, 2019, 10(6): e507.
- [34] 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 等. 缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1081-1090.

(上接第 165 页)

- [18] 赵宽, 吴沿友. 根系分泌的有机酸及其对喀斯特植物、土壤碳汇的影响[J]. 中国岩溶, 2011, 30(4): 466-471.
- [19] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 1-8.
- [20] 许小明, 邹亚东, 孙景梅, 等. 黄土高原北洛河流域主要林地枯落物特征及水分吸持效应[J]. 生态学报, 2021, 43(13): 5153-5165.
- [21] 周印东, 吴金水, 赵世伟, 等. 子午岭植被演替过程中土壤剖面有机质与持水性能变化[J]. 西北植物学报, 2003, 23(6): 895-900.
- [22] 雷利平, 王孝安, 郭华, 等. 子午岭地区辽东栎和油松林建群种的更新生态位宽度分析[J]. 西北植物学报, 2007, 27(7): 1446-1453.
- [23] 栾莉莉, 张光辉, 孙龙, 等. 黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 48-53.
- [24] 汪建芳, 王兵, 王忠禹, 等. 黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 139-144.
- [25] 肖胜生, 方少文, 杨洁, 等. 水土流失区植被恢复过程中土壤碳汇的形成机理[J]. 中国水土保持, 2011(12): 25-28.
- [26] Deng L, Wang K B, Chen M L, et al. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2013, 110: 1-7.

(上第 172 页)

- [19] Zhang B Q, He C S, Burnham M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 539: 436-449.
- [20] Shen M G, Piao S L, Jeong S J, et al. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(30): 9299-9304.
- [21] Yang H B, Yang D W, Lei Z D, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): 893-897.
- [22] 邵蕊. 黄土高原大规模植被恢复的区域蒸散耗水规律及其生态水文效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [23] Zhang M, Yuan X. Crucial role of natural processes in detecting human influence on evapotranspiration by multisource data analysis [J]. Journal of Hydrology, 2020, 580(3): e124350.
- [24] 郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 等. 基于 MODIS 蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 45-52.
- [25] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 等. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 594-606.