

DOI: 10.12357/cjea.20220980

孙天妙, 阳辉, 曹建生. 太行山区不同植被降雨再分配特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(9): 1471–1481
SUN T M, YANG H, CAO J S. Rainfall redistribution of different vegetations in Taihang Mountain, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(9): 1471–1481

太行山区不同植被降雨再分配特征*

孙天妙^{1,2}, 阳辉¹, 曹建生^{1**}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022;
2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 植被林冠层降雨再分配是森林生态系统重要的水文过程, 其研究对进一步探索太行山植被林冠层的水文效应, 揭示森林生态系统水源涵养功能具有重要意义。选取位于中国科学院太行山山地生态试验站自然荆条灌丛以及人工刺槐林、白皮松林、黄连木林、樱桃林、杜仲林、白蜡林、竹林为研究对象, 于2022年7—9月对8种林分的降雨再分配进行监测。结果表明: 1) 2022年雨季次降雨量波动性较大, 降雨时间分布不均主要集中在7月、8月。2) 总穿透雨量占总降雨量的比例均超过60%; 总树干径流量占总降雨量的比例最大的为杜仲林(13.94%), 其次为竹林(6.78%), 其余树种总树干径流量所占比例均低于5%; 总冠层截留量占总降雨量的比例, 白蜡林最大(32.97%), 白皮松林最小(7.53%), 整体上表现为穿透雨量>冠层截留量>树干径流量。3) 穿透雨量、树干径流量与林外降雨量呈一元线性函数关系, 冠层截留量与林外降雨量呈幂函数关系, 穿透雨率和树干径流率与林外降雨量呈对数函数关系(单调增函数); 冠层截留率与林外降雨量呈对数函数关系(单调减函数)。降雨再分配特征受降雨量及叶片吸水能力影响较大。因此, 合理选择林分类型, 调整不同林分比例可减少冠层截留量, 提高降水利用效率。

关键词: 太行山区; 降雨再分配; 穿透雨; 树干径流; 冠层截留; 叶片吸水能力

中图分类号: S157.2

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Rainfall redistribution of different vegetations in Taihang Mountain, China*

SUN Tianmiao^{1,2}, YANG Hui¹, CAO Jiansheng^{1**}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the implementation of ecological restoration projects, vegetation cover in the Taihang Mountains has increased, but the current situation of water shortages has still not been effectively improved. The impact of increased vegetation on hydrological processes is unknown. As the first action layer of rainfall reaches the terrestrial ecosystem, the vegetation canopy divides rainfall into throughfall, stemflow, and canopy interception. This changes the spatial distribution of the rainfall. Therefore, studying rainfall redistribution processes is important for exploring the relationship between vegetation and water. This study selected eight typical forests, natural *Vitex negundo*, and artificial forests of *Robinia pseudoacacia*, *Pinus bungeana*, *Pistacia chinensis*, *Eucommia ulmoides*,

* 河北省自然科学基金创新研究群体项目(D2021503001)、科技基础资源调查专项(2022FY100104)、河北省创新能力提升计划项目(20536001D)和河北省重点研发计划项目(20324201D)资助

** 通信作者: 曹建生, 主要从事山地生态水文过程与降水资源调控机制研究。E-mail: caoj@siziam.ac.cn

孙天妙, 主要研究方向为生态水文学。E-mail: stm15254173360@163.com

收稿日期: 2022-12-20 接受日期: 2023-04-21

* This study was supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2021503001), the Special Investigation Project for Scientific and Technological Basic Resources of China (2022FY100104), the Innovation Capability Enhancement Plan Project of Hebei Province (20536001D), and the Key Research and Development Plan Projects of Hebei Province (20324201D).

** Corresponding author, E-mail: caoj@siziam.ac.cn

Received Dec. 20, 2022; accepted Apr. 21, 2023

Cerasus pseudocerasus, *Fraxinus chinensis*, and *Garcinia multiflora*. Field monitoring and indoor experiments were conducted to explore the rainfall redistribution characteristics of different forest stands of the Taihang Mountains. The results of the study were as follows: 1) During the study year (2022), the rainfall amount was 480.0 mm, rainfall in the rainy season was 283.25 mm, the number of rainfall events in the rainy season was 20, the average amount per rainfall was 14.16 mm, and the variation range of rainfall intensity was 0.05–0.72 mm·h⁻¹, mainly consisting of rainfall events less than 5 mm·h⁻¹. The hypo-rainfall in the rainy season of 2022 fluctuated greatly, and the uneven distribution of rainfall time was mainly concentrated in July and August. 2) The proportion of total throughfall to total rainfall was greater than 60%. The lowest threshold of rainfall amount among eight vegetations for producing throughfall was 0.77 mm; *E. ulmoides* forest has the largest proportion of total stemflow in total rainfall, with a value of 13.94%, followed by *G. multiflora* forest (6.78%), and the proportion of total stemflow in the remaining species was less than 5%. The lowest threshold of rainfall amount for eight vegetations for producing stemflow was 3.35 mm; the proportion of total canopy interception of total rainfall was the largest in *F. chinensis* forest, accounting for 32.97%, and the smallest in *P. bungeana* forest, accounting for 7.53%. The overall performance was as follows: throughfall>canopy interception>stem flow. 3) Throughfall, stemflow, and canopy interception increased significantly with rainfall. Throughfall rate, stemflow rate, and funneling ratio increased rapidly and then leveled off with increasing rainfall amount. The canopy interception rate decreased rapidly and then leveled off with increasing rainfall. Rainfall redistribution characteristics were greatly affected by rainfall amount and leaf water absorption capacity. It was found that the canopy interception rate of *P. bungeana*, *R. pseudoacacia*, *E. ulmoides*, and *G. multiflora* forests was significantly smaller than that of natural *V. negundo*, which was important for reducing rainfall canopy interception evaporation and increasing effective rainfall. These four forests could therefore be considered for planting in water-shortage areas. Thus, reasonable selection of stand type and adjustment of stand proportions can reduce canopy interception and improve the efficiency of precipitation utilization. The results of this study provide a theoretical basis and data support for the selection of tree species in reforestation projects in the Taihang Mountains.

Keywords: Taihang Mountain; Rainfall redistribution; Throughfall; Stem flow; Canopy interception; Leaf water absorption capacity

森林生态系统以其复杂的功能层次结构对大气降水进行再分配,改变降水数量以及时空分布格局,进而实现森林水文涵养效应^[1]。植被冠层的降雨再分配过程是植被与水文相互作用的重要环节^[2-3],包括冠层截留、穿透雨、树干径流^[6-7]。冠层截留是指在降雨过程中以及降雨结束后以蒸散发的形式返回大气中的雨水,是降雨过程中的净损失项^[8];穿透雨包括穿过林冠层直接到达地面的雨水和从冠层枝叶滴落到地面的雨水^[9];树干径流是指沿树枝树干以点源形式汇集到深层土壤的雨水,对植物水分和养分输入具有重要意义^[10]。通过对降雨再分配的研究,可以更深入地了解森林水文过程及作用,是生态水文学研究的热点问题和前沿问题^[11-14]。

太行山区位于海河流域上游,是华北平原和京津冀地区重要的生态环境支撑区和水源涵养功能区,同时也是海河流域下游众多城市生产和服务用水的保障区。长期以来对土地的不合理利用导致该区水土流失严重,为恢复生态系统,自 1986 年我国实施太行山绿化工程以来,森林覆盖面积快速增加,但不适宜的造林方式导致该区水资源短缺,水位下降问题严重^[15-16],因此确认不同植被对天然降水的利用效率,研究林冠层截留量及其影响因素,对科学合理地改善和修复当地生态环境,提高下游地区的生态安全,缓解区域水资源短缺,减轻流域洪涝灾害威胁都具有极其重要的意义,可为华北地区生态环境保护和

可持续发展提供参考。

早在 20 世纪 90 年代初期,国际地圈生物圈计划(IGBP)提出了核心内容“水文循环的生物圈方面(BAHC)”,此后全球范围内开展了大量有关降雨再分配等方面的研究,国内学者也对我国南北不同气候区不同森林植被类型的降雨再分配过程做了大量研究。目前,关于降雨再分配的研究范围较广,包括北美德克萨斯州、亚马孙河流域、地中海地区以及国内的大兴安岭区、岷江上游、祁连山等区域;不同类型植被对降雨再分配作用存在很大差异,总体而言,对乔木林的研究相对较多,主要包括杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林、山杨(*Populus davidiana*)林、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林、杜仲(*Eucommia ulmoides*)林和马尾松(*Pinus massoniana*)林等针阔叶林。已有学者在太行山区开展降雨再分配相关研究,但多以单一林分为研究对象,而以多种林分为研究对象进行对比分析的研究相对较少,且对降雨再分配的研究多集中在林外降雨量、穿透雨量、树干径流量、冠层截留量总量和比例的分析,而对于降雨过程中随降雨量变化趋势以及阈值分析较少^[17-18]。河北太行山区植被类型较多,降雨再分配的研究大多集中在关于苹果(*Malus pumila*)、核桃(*Juglans regia*)等人工经济林,对天然灌木和次生林研究较少^[19],对其他植被类型少有系统研究,不利于对太行山低山丘陵区

降雨再分配规律、特征、影响机制的探索。因此,本研究选择河北太行山典型自然林[荆条(*Vitex negundo*)灌丛]以及人工林[刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、白皮松(*Pinus bungeana*)林、黄连木(*Pistacia chinensis*)林、杜仲林、樱桃(*Cerasus pseudocerasus*)林、竹(*Garcinia multiflora*)林、白蜡(*Fraxinus chinensis*)林],分析其降雨再分配过程,对其林冠层水文效应做定量分析,为人们探索太行山区植被生态水文动态提供基础,以揭示不同林分的水源涵养功能。

1 研究区概况

该研究在中国科学院太行山山地生态试验站(以下简称太行山站)内完成,太行山站位于海河流域,雄安新区上游,行政区划属于河北省石家庄市。地处37°52'44"N、114°15'50"E,海拔350 m左右,为低山丘陵区^[20]。气候属于半干旱半湿润大陆性季风气候,雨热同期,夏季炎热多雨,冬季干旱少雨,多年平均气温13℃,无霜期150~210 d,多年平均降水量513.2 mm^[21],多集中于7—9月,占全年降雨的

67.8%^[22];在全球变暖背景下,50年来出现温度升高、降水减少的趋势^[18-19]。土壤贫瘠,以粗骨性风化物上的褐土为主,兼有壤土、砂壤土、片麻岩和页岩石质土壤,土层厚度约0.5~2.5 m。该区植被类型以暖温带阔叶林被破坏后发育的次生灌草丛和低矮乔木以及人工栽培植被为主,主要包括灌木荆条、酸枣(*Zizyphus jujuba*),次生低矮乔木刺槐,草本黄背草(*Themeda japonica*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*),人工经济林樱桃林、核桃林等。

2 材料与方法

2.1 样地选择

于2022年6月在太行山站试区选取有代表性的天然林荆条灌丛以及人工林刺槐林、樱桃林、黄连木林、白皮松林、杜仲林、白蜡林、竹林为研究对象,分别在林内设置20 m×20 m的样地,以场外空地作为对照。调查并记录每个林分的特征(表1)。在2022年7—9月开展野外试验,在每个样地内选取5个随机点测定穿透雨,选取5株植被测定树干径流。

表1 研究区不同林分的特征
Table 1 Characteristics of different types of vegetation in the study area

植被 Vegetation	密度 Density (plants·hm ⁻²)	平均树高 Average tree height (m)	平均胸径 Average breast diameter (cm)	平均冠幅 Average crown width (m)	林龄 Age (a)	郁闭度 Crown density	
自然林 Natural forest	荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> brush	3143	2.3	—	2.5	/	0.5
人工林 Plantation	刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	2205	5.1	9.4	3.8	9	0.4
	白皮松林 <i>Pinus bungeana</i> forest	2771	1.8	3.0	3.7	7	0.4
	黄连木林 <i>Pistacia chinensis</i> forest	884	8.5	20.1	9.1	28	0.5
	杜仲林 <i>Eucommia ulmoides</i> forest	1697	13.5	15.1	4.5	30	0.6
	白蜡林 <i>Fraxinus chinensis</i> forest	1488	2.5	5.5	5.5	7	0.7
	樱桃林 <i>Cerasus pseudocerasus</i> forest	529	6.3	22.0	8.5	25	0.7
	竹林 <i>Garcinia multiflora</i> forest	45 530	10.0	2.0	1.0	28	0.4

灌木一般不考虑胸径,自然林未知林龄。Shrubs generally do not consider diameter at breast height, and the age of natural forests is unknown.

2.2 林外降雨观测

林外降雨测量地点为太行山站内,距离各样地之间直线距离最远不超过2 km,故该点测量的降雨量可代表样地的林外降雨量。林外降雨量采用人工和自动测定相结合的方法,在太行山站试区空旷处安装两个半径10 cm的圆筒,每场降雨后称重,换算成降雨量,并用太行山站长期气象站自动观测的降雨数据作为校正,以确保林外降雨的准确性。雨水收集以次降雨事件为基础,白天以间隔6 h为一次降雨事件^[12],于结束后30 min内立刻进行降雨量测定,由于受气象条件的影响,夜间降雨均按照1次降雨计算,第二天日出前完成测定^[23]。

2.3 林内穿透雨观测

林内穿透雨量(TF, mm)观测:采用自制降雨收集装置,在每种林分内各随机安装5组半径10 cm的雨量桶,为防止枯落物落入,在雨量桶口安装尼龙网,并在每次降雨后清洁尼龙网^[24]。每场降雨后称重换算成体积,然后换算成降雨量统一单位(mm)。

$$P_{TF} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{Ti} \times 10}{n \times A} \quad (1)$$

$$R_{TF} = \frac{P_{TF}}{P_{out}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_{TF} 为穿透雨率, P_{TF} 为穿透雨量(mm), P_{out} 为林

外降雨量 (mm), V_{Ti} 为第 i 个水桶中收集到的穿透雨的体积 (mL), A 为雨量桶横截面积 (cm^2)。

2.4 树干径流量观测

树干径流量 (SF, mm) 测定: 每个样地分别选择代表性植株 5 棵, 在树干基部 30 cm 以上, 以塑料管螺旋缠绕法收集树干径流, 采用直径为 3 cm 的聚乙烯塑料管, 将其抛开后与水平面呈 45° 角倾斜缠绕至树干上 2~3 圈, 将胶管一侧紧贴树干, 用大头钉固定, 用防水玻璃胶将塑料管边缘与树干密封, 胶管末端为管状, 将水导入下方塑料桶中^[25], 为防止穿透雨沿管壁进入容器, 接口处用防水密封胶泥密封。每次降雨后测量桶内水重量, 换算成体积, 最终换算成降雨量统一单位 (mm)^[26]。

$$P_{ST} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n \times S_p \times 1000} \quad (3)$$

$$R_{ST} = \frac{P_{ST}}{P_{out}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: P_{ST} 为树干径流量, R_{ST} 为树干径流率, V_i 为第 i 个桶中树干径流的体积 (mL), n 为测树干径流个数, S_p 为样地植株平均冠幅面积 (m^2)。

2.5 冠层截留计算

冠层截留量 (IF, mm) 计算: 冠层的截流量由水量平衡公式计算所得, 为林外降雨与树干径流、穿透雨的差值, 表示冠层截留的数量。冠层截留率为冠层截流量占林外降雨的百分比, 表示冠层截留的

效率、快慢。

$$P_{IF} = P_{out} - P_{TF} - P_{ST} \quad (5)$$

$$R_{IF} = \frac{P_{IF}}{P_{out}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_{IF} 为冠层截留率, P_{IF} 为冠层截留量 (mm)。

2.6 叶片吸水能力计算

叶片吸水能力用叶片最大吸水量表示, 在每个样地采集大、中、小叶片各 20 片叶片, 将其分别称重后浸泡清水中 24 h, 取出后悬挂至无明显水滴落下, 进行称重^[27]。

$$W = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{m_{i1} - m_{i2}}{m_{i2}} \quad (7)$$

式中: W 为叶片最大吸水量 (g), n 为叶片个数, m_{i1} 为浸泡后叶片重量 (g), m_{i2} 为新鲜叶片重量 (g)。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

研究区 2022 年 7—9 月共监测到 20 场降雨, 人工监测降雨与太行山站长期气象站自动监测降雨数据无显著差异 ($F=0.0028$, $P=0.9575$) (表 2)。因试验中穿透雨量和树干径流量均为人工监测测量值, 为减小误差, 本文林外降雨量采用人工监测值, 人工监测总降雨量为 283.25 mm, 平均降雨量为 14.16 mm, 标准差和变异系数分别为 20.53 mm 和 145%, 表明降雨量波动性较大, 单次最大降雨量为 69.39 mm (7 月 12 日), 单次最小降雨量为 0.07 mm (7 月 17 日) (图 1)。

表 2 研究区域降雨特征统计
Table 2 Statistics of regional rainfall characteristics

降雨等级 Rainfall grade (J , mm)	降雨次数 Number of rains	降雨累计量 Cumulative rainfall (mm)	占总降雨量百分比 Percentage of total rainfall (%)
$0 < J < 10$	13	48.69	17.19
$10 \leq J < 25$	4	56.24	19.86
$25 \leq J < 50$	1	45.02	15.89
$50 \leq J < 100$	2	133.30	47.06

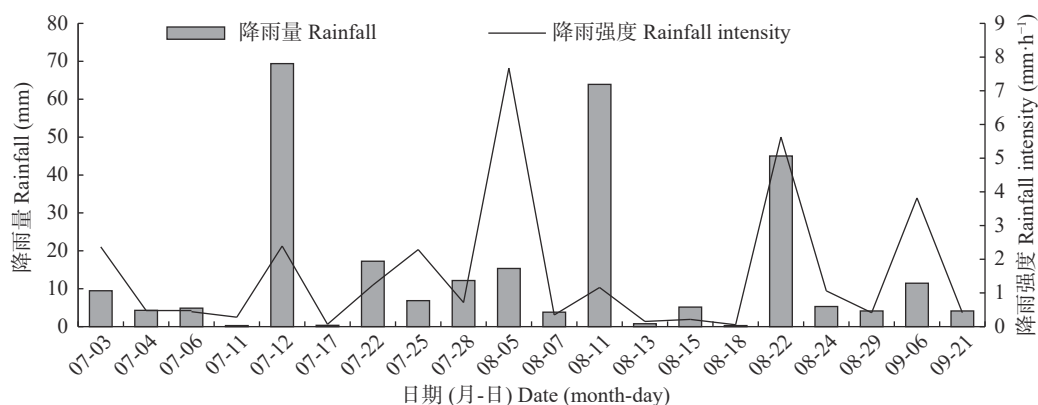


图 1 研究时段内逐次降雨特征

Fig. 1 Characteristics of successive rainfall in the study period

由表 2 可知, 研究时段降雨主要以 $0\text{ mm}<J<10\text{ mm}$ 的降雨事件为主, 降雨频率最大, 共降雨 13 次, 占总降雨场次的 65.00%, 但其累计降雨量占总降雨量比例较小, 对总降雨量影响较小; $50\text{ mm}\leq J<100\text{ mm}$ 降雨发生频率较小, 但累计降雨量占总降雨量的比例最大 (47.06%), 对总降雨量影响较大。从降雨强度来看, 本研究中降雨强度变化范围为 $0.05\sim7.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 主要以 $<5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降雨事件为主, 包括小雨、中雨、大雨和暴雨。

本研究采用干燥指数 (DI) 来划分年型: $DI=(P-M)/\sigma$, P 为当年降雨量 (mm), M 为多年平均降雨量 (mm), σ 为标准差, $DI<-0.35$ 为枯水年, $-0.35\leq DI\leq 0.35$ 为平水年, $DI>0.35$ 为丰水年。1997—2021 年雨季平均降雨量为 332.31 mm , 标准差为 143.81 , 2022 年雨季降雨量为 283.25 mm , 计算可得 $DI=-0.34$, 因此 2022 年雨季降雨量属于平水年份, 具有较好的代表性。

3.2 不同林分降雨再分配特征

监测期间共得到 20 场降雨再分配事件, 整体上均表现为穿透雨量>冠层截留量>树干径流量, 与之前研究结果一致^[28-30], 不同林分之间降雨再分配比例差别较大。

研究期间, 8 种林分均有超过一半的降雨以穿透雨的形式降落, 总穿透雨量占总降雨量的比例从大到小依次为: 白皮松林>刺槐林>竹林>荆条灌丛>黄连木林>杜仲林>樱桃林>白蜡林, 白皮松林总穿透雨量占总降雨量比例最大, 白蜡林最小, 二者相差 26.57%。平均穿透雨量表现为白皮松林>刺槐林>荆条灌丛>竹林>黄连木林>杜仲林>樱桃林>白蜡林, 与总穿透雨量分别占总降雨量比例排序基本一致 (表 3)。人工林总穿透雨量占总降雨量比例平均为 74.45%, 自然林为 73.62%, 自然林略小于人工林但相差不大。

由表 3 可知, 整体上树干径流量占总降雨量比例

表 3 不同林分降雨再分配统计分析
Table 3 Statistical analysis of rainfall redistribution in different types of vegetation

植被 Vegetation	穿透雨 Throughfall			树干径流 Stemflow			冠层截留 Interception		
	平均次穿透雨量 Average amount of throughfall once (mm)	总量 Total amount (mm)	总穿透雨率 Total throughfall rate (%)	平均次树干 径流量 Average amount of stemflow once (mm)	总量 Total amount during observation period (mm)	总树干径 流率 Total stemflow rate (%)	平均次冠层 截留量 Average amount of interception once (mm)	总量 Total amount (mm)	总冠层 截留率 Total interception rate (%)
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest 荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> brush	12.16±18.03	243.17	85.85	0.67±0.89	13.31	4.70	1.34±1.29	26.77	9.45
白皮松林 <i>Pinus bungeana</i> forest 黄连木林 <i>Pistacia chinensis</i> forest 杜仲林 <i>Eucommia ulmoides</i> forest	12.95±20.00	259.03	91.45	0.15±0.17	2.89	1.02	1.07±0.84	21.33	7.53
白蜡林 <i>Fraxinus chinensis</i> forest 樱桃林 <i>Cerasus pseudocerasus</i> forest 竹林 <i>Garcinia multiflora</i> forest	10.00±16.03	199.95	70.59	0.19±0.26	3.74	1.32	3.98±4.11	79.56	28.09
	9.50±14.36	190.09	67.11	1.97±3.15	39.49	13.94	2.68±2.61	53.68	18.95
	9.19±14.01	183.77	64.88	0.30±0.36	6.09	2.15	4.67±5.70	93.39	32.97
	9.37±14.18	187.40	66.16	0.35±0.51	6.94	2.45	4.44±5.45	88.91	31.39
	10.63±15.75	212.66	75.08	0.96±1.26	19.2	6.78	2.57±3.34	51.38	18.14

较小, 表现为杜仲林>竹林>刺槐林>荆条灌丛>樱桃林>白蜡林>黄连木林>白皮松林, 杜仲林总树干径流量占总降雨量比例最大, 其次为竹林, 其余林分均小于 5%, 白皮松林最小 (仅为 1.02%), 此结果与单层针叶林树干径流量明显小于其他植被类型的研究结果一致^[31-32]。平均次树干径流量表现为杜仲林>竹林>刺槐林>荆条灌丛>樱桃林>白蜡林>黄连木林>白皮松林, 与总树干径流量分别占总降雨量比例排序一致。人工林总树干径流量占总降雨量比例平均为 4.62%, 大于自然林 (3.06%), 产生此现象的原因可能是人工林平均树高和胸径较大, 汇集雨水的能力较强。

不同林分冠层截留率表现为白蜡林>樱桃林>黄连木林>荆条灌丛>杜仲林>竹林>刺槐林>白皮松林, 白蜡林的总截留量占总降雨量比例为所有树种中最

大值, 樱桃林略低, 使接近 1/3 的降雨成为无效降雨, 白皮松林总冠层截留量占总降雨量比例最低, 此现象可能与白皮松林的林隙最大有关^[33]。平均次冠层截留量表现白蜡林>樱桃林>黄连木林>荆条灌丛>杜仲林>竹林>刺槐林>白皮松林, 与总冠层截留量分别占总降雨量比例排序一致 (表 3)。人工林总冠层截留量占总降雨量的比例小于自然林, 产生此现象的原因可能是人工林穿透雨率和树干径流率较高, 经水量平衡计算后冠层截留率小于自然林。

冠层截留量与叶片吸水能力整体上呈正相关关系 (表 4), 叶片最大吸水量表现为白蜡林>荆条林>樱桃林、黄连木林>竹林>杜仲林>刺槐林>白皮松林, 可以看出叶片最大吸水量由低到高对应植被类型与冠层截留率基本相同, 即叶片最大吸水量越大, 冠层截留能力越强。

表 4 不同林分叶片吸水能力和冠层截留统计分析

Table 4 Statistics and analysis of leaf water absorption capacity and canopy interception of different types of vegetation

植被 Vegetation	叶片最大吸水量 Maximum water absorption of leaves (g)	冠层截留率 Canopy interception rate (%)
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	0.03	9.45
荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> brush	0.07	23.32
白皮松林 <i>Pinus bungeana</i> forest	0.02	7.53
黄连木林 <i>Pistacia chinensis</i> forest	0.06	28.09
杜仲林 <i>Eucommia ulmoides</i> forest	0.04	18.95
白蜡林 <i>Fraxinus chinensis</i> forest	0.08	32.97
樱桃林 <i>Cerasus pseudocerasus</i> forest	0.06	31.39
竹林 <i>Garcinia multiflora</i> forest	0.05	18.14

综上所述, 白蜡林冠层截留率最高, 白皮松林冠层截留率最低, 产生此现象的原因可能是白蜡林叶片面积大且叶片吸水能力强, 而白皮松林叶片面积最小且吸水能力最弱, 因此可拦截的降雨最少; 杜仲林树干径流率最高, 猜测产生此现象的原因是杜仲树干有纵向纹路, 且树干较高大笔直, 有利于树干径流的汇集和运输。

3.3 不同林分降雨再分配与降雨量的关系

3.3.1 穿透雨与降雨量的关系

为研究降雨量对穿透雨量的影响, 将林外降雨量与穿透雨量进行拟合, 拟合方程如表 5 所示。分析结果显示: 1) 穿透雨量与林外降雨量呈极显著一次线性函数关系, 随降雨量增加而增加, 且 R^2 均大于 0.95, 说明穿透雨量主要由降雨量决定。斜率表示

表 5 不同林分降雨量与穿透雨量及穿透雨率拟合关系

Table 5 Fitting relationships between rainfall and throughfall and throughfall rate of different types of vegetation

植被 Vegetation	穿透雨量 Throughfall		穿透雨率 Throughfall rate	
	拟合方程 Fitting equation	R^2	拟合方程 Fitting equation	R^2
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	$y=0.9007x-0.5972$	0.9993	$y=0.1317\ln x+0.4711$	0.8715
荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> brush	$y=1.0825x-2.6756$	0.9849	$y=0.1618\ln x+0.1994$	0.7482
白皮松林 <i>Pinus bungeana</i> forest	$y=1.1097x-0.5698$	0.9985	$y=0.1843\ln x+0.3336$	0.7555
黄连木林 <i>Pistacia chinensis</i> forest	$y=0.8841x-0.7077$	0.9926	$y=0.1377\ln x+0.2589$	0.9270
杜仲林 <i>Eucommia ulmoides</i> forest	$y=0.7974x-0.2288$	0.9991	$y=0.1298\ln x+0.2734$	0.7857
白蜡林 <i>Fraxinus chinensis</i> forest	$y=0.7748x-0.1833$	0.9974	$y=0.1135\ln x+0.2999$	0.8917
樱桃林 <i>Cerasus pseudocerasus</i> forest	$y=0.7834x-0.0930$	0.9962	$y=0.1054\ln x+0.339$	0.8915
竹林 <i>Garcinia multiflora</i> forest	$y=0.7857x-0.4945$	0.9961	$y=0.0909\ln x+0.4999$	0.6731

穿透雨量随降雨量增加的变化速率,由表 5 可知白皮松林、荆条灌丛、刺槐林的变化速率较大,而黄连木林、杜仲林次之,樱桃林、竹林和白蜡林穿透雨量随降雨量变化速率较低。2) 林外降雨量超过一定阈值会触发产生穿透雨,测量结果表明,在林外降雨量为 0.28 mm 时即可触发刺槐林、竹林和樱桃林产生穿透雨,在林外降雨为 0.77 mm 时可触发其他林分产生穿透雨,8 种林分均表现为较小的降雨量即可触发产生穿透雨。3) 白皮松林穿透雨量最高,随林外降雨量增加的增长速率最大,白蜡林、樱桃林、杜仲林穿透雨量随林外降雨量变化基本相同,产生的穿透雨量较低,增长速率较慢。

为研究降雨量对穿透雨率的影响,将林外降雨量与穿透雨率进行拟合(表 5)。分析结果显示:穿透雨率与林外降雨量呈对数函数关系,且 R^2 均大于 0.6,随着降雨量的增加,穿透雨率升高,当降雨量较小(0~5 mm)时,穿透雨率随降雨量增加而增加的幅度最大,穿透雨率随降雨量变化敏感,而随着林外降雨量增加(5~20 mm)时,穿透雨率增长速率减小,当降雨量较大(>20 mm)时,穿透雨率随降雨量增加的速率逐渐趋于稳定。

3.3.2 树干径流与降雨量的关系

为研究降雨量对树干径流量的影响,将林外降雨量与树干径流量进行拟合,树干径流量与穿透雨量呈一次线性函数关系, R^2 均大于 0.7(表 6),拟合方程 $y=ax+b$ 的斜率(a)表示树干径流量随林外降雨量增加而增加的幅度。从方程的参数可以推断,8 条拟合线的斜率具有较大差异,不同林分树干径流随降雨量增加的变化速率不同,杜仲林的拟合线斜率明显大于其他林分,说明杜仲林树干径流量随降雨量增大的速率更快。测量结果表明,刺槐林、荆条灌丛、杜仲林、竹林在林外降雨量 0.77 mm 时即可触发产生树干径流,而其他林分则在林外降雨量较大(>3.35 mm)时才可触发产生树干径流。

为研究降雨量对树干径流率的影响,将林外降雨量与树干径流率进行拟合,树干径流率与穿透雨量呈对数函数关系(表 6),在降雨量<5 mm 时随着林外降雨量的增加,树干径流率增长速度较快,在林外降雨量为 5~15 mm 时,随降雨量增加树干径流率增长速率减慢,降雨量>15 mm 后,树干径流率变化趋于稳定。

表 6 不同林分降雨量与树干径流量及树干径流率拟合关系
Table 6 Fitting relationship between rainfall and stemflow and stemflow rate of different types of vegetation

植被 Vegetation	树干径流量 Stemflow		树干径流率 Stemflow rate	
	拟合方程 Fitting equation	R^2	拟合方程 Fitting equation	R^2
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	$y=0.0427x+0.0619$	0.9294	$y=0.0093\ln x+0.0232$	0.4162
荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> brush	$y=0.0314x-0.0119$	0.9853	$y=0.0050\ln x+0.0175$	0.4621
白皮松林 <i>Pinus bungeana</i> forest	$y=0.0079x+0.0326$	0.8981	$y=0.0009\ln x+0.0094$	0.0503
黄连木林 <i>Pistacia chinensis</i> forest	$y=0.0118x+0.0199$	0.8386	$y=0.0040\ln x+0.0050$	0.2550
杜仲林 <i>Eucommia ulmoides</i> forest	$y=0.1568x-0.2464$	0.9933	$y=0.0273\ln x+0.0500$	0.5046
白蜡林 <i>Fraxinus chinensis</i> forest	$y=0.0161x+0.0762$	0.7807	$y=0.0034\ln x+0.0169$	0.1406
樱桃林 <i>Cerasus pseudocerasus</i> forest	$y=0.0235x+0.0151$	0.8470	$y=0.0048\ln x+0.0135$	0.3241
竹林 <i>Garcinia multiflora</i> forest	$y=0.0533x+0.2056$	0.7214	$y=0.0099\ln x+0.0544$	0.0465

3.3.3 冠层截留与降雨量的关系

在森林生态系统中,冠层截留受林外降雨特征影响较大,冠层截留量与林外降雨量的关系用幂函数拟合效果最好(表 7),在降雨量小于 20 mm 时,冠层截留量随降雨量增加速率较快,但随着降雨量的增加,冠层截流量增加速率降低。不同倾斜程度表示不同植被类型冠层截留量随降雨量增加的变化幅度,不同林分的冠层截留量随降雨量的增加差距逐渐增大,荆条灌丛白蜡林、樱桃林、黄连木林的冠

层截留量随降雨量增加变化明显,竹林冠层截留量随降雨量的增长幅度最小。通过对冠层截留率与降雨量之间进行曲线拟合(表 7),发现 8 种林分冠层截留率与降雨量均呈对数函数关系。测量结果表明,当降雨量较小时(<20 mm),冠层截留率随降雨量的增加显著减小,刺槐林、白皮松林、竹林变化幅度较小,杜仲林居中,荆条灌丛、樱桃林、黄连木林、白蜡林变化幅度较大;降雨量较大时(>20 mm),冠层截留率随降雨量增加缓慢减小并逐渐趋于稳定。

表 7 不同林分降雨量与冠层截留量及冠层截留率拟合关系

Table 7 The fitting relationship between rainfall and interception and interception rate of different types of vegetation

植被 Vegetation	冠层截留量 Interception		冠层截留率 Interception rate	
	拟合方程 Fitting equation	R^2	拟合方程 Fitting equation	R^2
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	$y=0.3957x^{0.5088}$	0.8243	$y=-0.141\ln x+0.5057$	0.8599
荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> brush	$y=0.8261x^{0.3220}$	0.1833	$y=-0.167\ln x+0.7831$	0.7640
白皮松林 <i>Pinus bungeana</i> forest	$y=0.5209x^{0.2390}$	0.2204	$y=-0.185\ln x+0.6570$	0.7497
黄连木林 <i>Pistacia chinensis</i> forest	$y=0.6928x^{0.7299}$	0.9791	$y=-0.140\ln x+0.7346$	0.9159
杜仲林 <i>Eucommia ulmoides</i> forest	$y=0.5618x^{0.6425}$	0.8500	$y=-0.157\ln x+0.6766$	0.7646
白蜡林 <i>Fraxinus chinensis</i> forest	$y=0.6409x^{0.7882}$	0.9907	$y=-0.117\ln x+0.6832$	0.8905
樱桃林 <i>Cerasus pseudocerasus</i> forest	$y=0.6076x^{0.7914}$	0.9919	$y=-0.110\ln x+0.6475$	0.8906
竹林 <i>Garcinia multiflora</i> forest	$y=0.3447x^{0.7374}$	0.8752	$y=-0.101\ln x+0.4457$	0.6575

4 讨论和结论

本研究从森林水文过程角度研究不同植被降雨再分配过程并分析其影响因素, 不仅为太行山植树造林树种选择提供数据支撑, 还可有效缓解太行山区水资源短缺问题提供重要数据支撑及科学依据, 对京津冀地区可持续发展具有重要意义。

研究表明试验区降雨年内分布不均, 2022 年降雨量为 480.00 mm, 其中雨季(研究期)降雨量为 283.25 mm, 占年降雨量的 59.01%, 年降雨和雨季降雨均以小雨为主。7—9 月平均次降雨量为 14.16 mm; 单次降雨量小于 10 mm 的降雨次数最多, 但累计降雨量占总降雨量比例较小, 对总降雨量影响较小; 而单次降雨量大于 50 mm 的降雨次数较少, 但累计降雨量占总降雨量比例大, 对总降雨量影响较大。整体上降雨次数较少但降雨量较大, 降雨量时间分布不均, 主要集中在 7 月、8 月。2022 年雨季降雨量与多年雨季降雨量相差较小, 属于平水年份 ($-0.35 < DI < 0.35$), 具有较好的代表性。

降雨经植被冠层再分配后, 占比最大的是穿透雨, 其次是冠层截留, 占比最小的是树干径流。其中自然林穿透雨率和树干径流率均小于人工林, 冠层截留率高于人工林。8 种林分均有超过 60% 的降雨以穿透雨的形式降落, 穿透雨量与降雨量呈一次线性函数关系, 穿透雨率均随降雨量呈对数函数增加。降雨再分配中, 树干径流量占比最小, 树干径流量随降雨量增加呈线性增加趋势, 树干径流率与降雨量呈对数函数关系。8 种林分总冠层截留量占总降雨量比例为 7.53%~32.97%, 不同林分间存在较大差异, 冠层截留量与降雨量呈幂函数关系, 冠层截留率随降雨量呈对数函数关系, 随降雨量的增加先迅速减少后逐渐趋于稳定, 且冠层截留量与叶片最大吸水量基本呈正相关关系。综上所述, 穿透雨率、树干径流率及冠层截留率随降雨量增加均表现为先快速

变化后逐渐稳定, 产生此现象的原因可能是冠层的截留及汇集雨水的能力存在一个阈值, 到达此阈值后变化逐渐减小。降雨强度对降雨再分配影响较为复杂, 通常认为穿透雨率与降雨强度呈正相关关系, 在暴雨及特大暴雨时穿透雨率达最大值且逐渐趋于稳定, 树干径流率与降雨强度的关系存在争议, 有学者认为树干径流率在暴雨及特大暴雨时会降低, 也有学者认为树干径流率随降雨强度增加而增加, 达到某一阈值后随降雨强度增加而减小, 通常认为冠层截留率在暴雨及特大暴雨时可以完全忽略^[34-35]。

本研究中, 8 种林分均产生穿透雨的最小降雨量为 0.77 mm, 此结果与凡国华等^[29]研究结论杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林形成穿透雨的最小雨量 0.9 mm、王昱程^[36]研究结论冀北山地阔叶林形成穿透雨的最小降雨量为 0.78 mm、以及雷丽群等^[35]研究结论红锥 (*Castanopsis hystrix*) 人工林产生穿透雨的最小降雨量为 0.6 mm 等基本一致。本研究中 8 种林分产生树干径流的最小降雨量为 3.35 mm, 此结论与李成等^[37]在山东泰山麻栎 (*Quercus acutissima*) 人工林得出的产生树干径流最小降雨量 3.7 mm、杜妍等^[38]在苏南丘陵区毛竹林 (*Phyllostachys edulis*) 得出的产生树干径流最小降雨量 1.3 mm 的结论基本一致。因此, 本研究认为林外降雨较小时即可产生穿透雨, 而产生树干径流的最小林外降雨量大于产生穿透雨的最小林外降雨量。

不同林分降雨再分配特征具有较大差异。白皮松林穿透雨量和穿透雨率明显高于其他林分, 产生此现象的原因可能是白皮松叶面积明显小于其他植被, 叶片可拦截雨水较少, 因而形成的穿透雨率较高, 樱桃林、白蜡林、杜仲林的穿透雨量和穿透雨率明显低于其他林分, 可能原因是其叶面积相对较大, 叶片可拦截雨水能力较强, 产生的穿透雨较少。相关研究表明穿透雨与降雨量之间的关系可能受到植被

类型和冠层形态特征的影响。相关研究表明,林分密度、郁闭度、枝干粗糙程度、枝长等植被特征也对降雨再分配产生影响,通常认为林分密度和郁闭度主要影响穿透雨和冠层截留,而枝干粗糙程度、枝长和分枝角度主要影响树干径流^[39-40]。

杜仲林树干径流量和树干径流率最大,且随降雨量变化最明显,产生此现象的原因可能是杜仲的树枝与树干的夹角明显小于其他林分,且杜仲树干较笔直且具有纵向纹路,因而汇集和传输雨水的力量较强,从而导致其树干径流量最大;竹林的树干径流率次于杜仲林,但高于其他林分,产生此现象的原因可能是竹子枝干表面光滑,有利于树干径流的传输。表明树干径流与降雨量的关系可能同时受到冠幅、胸径以及树枝与树干夹角的影响,在冠幅和胸径基本一致时,树枝与树干的夹角越大,冠层水分不能汇集于树干,产生的树干径流越小。白皮松林树干径流量最小,为1.02%,此结论与凡国华等^[29]、孙姗姗等^[25]研究的马尾松(*Pinus massoniana*)林和樟子松(*Pinus sylvestris*)林树干径流量占降雨量的0.94%和2.54%基本一致,可能由于白皮松林和马尾松林均为针叶林,叶面积较小,汇集雨水能力弱所导致,与黄承标等^[41]对广西亚热带地区不同林地的研究结论(针叶林树干径流量小于阔叶林)一致。

冠层截留量和冠层截留率表现为白蜡林>樱桃林>黄连木林>荆条灌丛>杜仲林>竹林>刺槐林>白皮松林。冠层截留受到叶片吸水能力的影响,叶片最大吸水量越大,叶片越不易达到饱和,产生的冠层截留量越大。同时发现艾长江等^[42]对黄土高原柠条(*Caragana korshinskii*)灌丛研究所得出的“小型短枝收拢型柠条植株比大型长枝半球型柠条的截留量低”同样适用于本文植被类型,即冠幅较小且树枝与树干夹角越小的植被类型产生的林冠截留相对较小。综上所述,不同林分之间的降雨再分配特征具有较大差异,主要受植被特征的影响,包括叶片吸水能力、叶面积、枝干夹角、枝干粗糙程度和冠幅等。

研究发现,白皮松林、刺槐林、杜仲林和竹林的冠层截留率明显小于自然荆条灌丛,对于减少降水冠层截留、增加有效降水具有重要作用,因而在水资源短缺区域可考虑种植这4种植被。水资源短缺是河北太行山区面临的重要生态环境问题^[43],因此该区域未来人工林营造及抚育过程中,可合理考虑种植培育刺槐林、杜仲林、竹林和白皮松林,提高对天然降水的利用效率。

参考文献 References

- [1] 董玲玲, 康峰峰, 韩海荣, 等. 辽河源3种林分降雨再分配特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 145-150
DONG L L, KANG F F, HAN H R, et al. Traits and influencing factors of rainfall redistribution in three types of forest in Liaoheyuan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 145-150
- [2] 金伟, 郑子成, 张锡洲, 等. 川中丘陵区高粱植株对降雨再分配的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 57-61, 66
JIN W, ZHENG Z C, ZHANG X Z, et al. The effect of *Sorghum* plants on rainfall redistribution processes in hilly area of central Sichuan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 57-61, 66
- [3] 梁文俊, 丁国栋, 臧荫桐, 等. 华北土石山区油松林对降雨再分配的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 77-80
LIANG W J, DING G D, ZANG Y T, et al. Study on effect of *Pinus tabulaeformis* plantation on rainfall redistribution processes in the mountainous area of North China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(4): 77-80
- [4] 李佳, 饶良懿, 鲁绍伟, 等. 北京密油松与刺槐林降雨再分配过程研究[J]. *广东农业科学*, 2012, 39(12): 169-174
LI J, RAO L Y, LU S W, et al. Pine and locust forest on rainfall redistribution in Miyun of Beijing[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39(12): 169-174
- [5] 刘兰, 刘怡, 孙佳瑞, 等. 成都市绿地常见乔木降雨再分配及其穿透雨的空间异质性[J]. *中国城市林业*, 2022, 20(3): 29-35, 68
LIU L, LIU Y, SUN J R, et al. Rainfall redistribution of common tree species in Chengdu City and its throughfall's spatial heterogeneity[J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2022, 20(3): 29-35, 68
- [6] FATHIZADEH O, HOSSEINI S M, ZIMMERMANN A, et al. Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602: 1824-1837
- [7] ZHANG Y F, WANG X P, HU R, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 1084-1095
- [8] DAVID T S, GASH J H C, VALENTE F, et al. Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(13): 2713-2726
- [9] LEVIA Jr D F, FROST E E. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2006, 30(5): 605-632
- [10] 杨志鹏, 李小雁, 伊万娟. 荒漠灌木树干茎流及其生态水文效应研究进展[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 303-311
YANG Z P, LI X Y, YI W J. Review on stemflow of desert shrubs-research methods and eco-hydrological effects[J].

- Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 303–311
- [11] YAN T, WANG Z H, LIAO C G, et al. Effects of the morphological characteristics of plants on rainfall interception and kinetic energy[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125807
- [12] 王伟杰, 王秋月, 易军, 等. 三峡山地不同林型冠层截留特征及再分配过程研究[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 56(3): 541–550
- WANG W J, WANG Q Y, YI J, et al. Canopy interception and redistribution process of different types of forest in the hillslope of the Three Gorges Area[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2022, 56(3): 541–550
- [13] 赵宏亮. 贺兰山蒙古扁桃灌丛降雨再分配及人工集雨效果研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022
- ZHAO H L. Study on rainfall redistribution and artificial rainfall collection of *Prunus mongolica* shrub in Helan Mountain[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022
- [14] 汪水前. 南方水土流失区马尾松对降雨再分配的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(2): 99–105
- WANG S Q. Effects of *Pinus massoniana* in soil erosion area in South China on rainfall redistribution[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(2): 99–105
- [15] 刘洪升. 明清滥伐森林对海河流域生态环境的影响[J]. *河北学刊*, 2005, 25(5): 134–138
- LIU H S. Influence of denudation forest to the ecological environment of the Haihe River valley in the Ming & Qing[J]. *Hebei Academic Journal*, 2005, 25(5): 134–138
- [16] 赵景波, 李瑜琴. 陕西黄土高原土壤干层对植树造林的影响[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(3): 370–373
- ZHAO J B, LI Y Q. Effects of soil-drying layer on afforestation in the loess plateau of Shaanxi[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(3): 370–373
- [17] 邱治军, 周光益, 吴仲民, 等. 粤北杨东山常绿阔叶次生林林冠截留特征[J]. *林业科学*, 2011, 47(6): 157–161
- QIU Z J, ZHOU G Y, WU Z M, et al. Characteristics of the canopy interception in an evergreen broad-leaved secondary forest in Yangdongshan, North Guangdong[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(6): 157–161
- [18] 李鹏飞, 刘文军, 赵昕奕. 京津冀地区近50年气温、降水与潜在蒸散量变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 137–143
- LI P F, LIU W J, ZHAO X Y. The changes of atmospheric temperature, precipitation and potential evapotranspiration in Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 50 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3): 137–143
- [19] 刘希庆, 邢晓光, 刘凤娟, 等. 河北省太行山4种经济林林冠层的水文效应[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 83–87
- LIU X Q, XING X G, LIU F C, et al. Canopy hydrological effects of four economic forests in Taihang Mountain, Hebei Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(2): 83–87
- [20] 司梦可, 曹建生, 阳辉, 等. 太行山区不同植被条件下土壤水分动态变化特征研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(11): 1766–1777
- SI M K, CAO J S, YANG H, et al. Soil water variation of different vegetation community in Taihang Mountain Area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(11): 1766–1777
- [21] 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 等. 基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律[J]. *环境科学*, 2019, 40(4): 1770–1778
- ZHENG W B, WANG S Q, LIU B X, et al. Simulation of the migration and leaching of nitrate nitrogen in the farmland soil profile in a hilly area of Taihang Mountain with the RZWQM model[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1770–1778
- [22] 孙甲霞, 张万军, 曹建生. 太行山低山区主要植被下土壤贮水量和土壤水分利用效率研究[J]. *华北农学报*, 2008, 23(S1): 173–177
- SUN J X, ZHANG W J, CAO J S. Study on soil moisture characteristics and water use efficiency of three different vegetations in the low Taihang mountains areas[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(S1): 173–177
- [23] 张雪, 赵锦梅, 雷隆举, 等. 祁连山东段六种灌丛降雨再分配特征[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(1): 83–89
- ZHANG X, ZHAO J M, LEI L J, et al. Characteristics of rainfall redistribution of six shrubs in eastern Qilian Mountain[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(1): 83–89
- [24] 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
- LI L Q, YANG H X, DING G Q, et al. Precipitation redistribution characteristics and its correlation analysis of *Pinus densiflora* and *Quercus mongolica* forests in the Liaodong Peninsula of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(11): 47–55
- [25] 孙姗姗, 刘新平, 王翠萍, 等. 半干旱沙地樟子松林降雨再分配特征[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(1): 109–117
- SUN S S, LIU X P, WANG C P, et al. Precipitation redistribution characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in semiarid sandy land[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(1): 109–117
- [26] 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
- HE C Q, XUE J H, WU Y B, et al. Rainfall redistribution in subalpine *Quercus aquifolioides* forest in upper reaches of Minjiang River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1871–1876
- [27] 李晶晶, 白岗栓, 张蕊. 陕北丘陵沟壑区常见树种叶片的吸水性能[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(1): 99–102
- LI J J, BAI G S, ZHANG R. Water absorption of common trees leaves in loess hilly and gully region of Northern Shaanxi[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(1): 99–102
- [28] 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
- TIAN N, GU J L, YANG X G, et al. Redistribution of rainfall in canopy of *Caragana intermedia*[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(4): 854–862
- [29] 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
- FAN G H, HAN C, SUN Y T, et al. Rainfall redistribution in *Pinus massoniana* forest of Yangtze River Delta[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(2): 422–428
- [30] 李联地, 左万星, 忻富宁, 等. 山涧口流域2种林分降雨及再分配特征[J]. *福建林业科技*, 2018, 45(4): 5–10
- LI L D, ZUO W X, XIN F N, et al. Rainfall and redistribution characteristics of two kinds of stands in Shanjiankou Basin[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2018, 45(4): 5–10
- [31] 高会, 付同刚, 梁红柱, 等. 太行山区生态系统服务冷热点区域识别及其权衡/协同关系分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(7): 1045–1053
- GAO H, FU T G, LIANG H Z, et al. Cold/hot spots identification and tradeoff/synergy analysis of ecosystem services in Taihang Mountain area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(7): 1045–1053
- [32] 庞维华, 孙雅婕, 刘建军. 不同类型园林植物群落冠层的截留能力研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 49–55
- PANG W H, SUN Y J, LIU J J. Canopy interception ability of different types of garden plant communities[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4): 49–55
- [33] 李登武, 李淑静, 耿义良. 黄龙山白皮松林林隙特征[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(7): 12–14
- LI D W, LI S J, GENG Y L. Gap characteristics in *Pinus bungeana* forest in Huanglong Mountain, Shaanxi Province[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(7): 12–14
- [34] LEVIA D F, HERWITZ S R. Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils[J]. *CATENA*, 2005, 64(1): 117–137
- [35] 雷丽群, 郑路, 农友, 等. 降雨特征对红锥人工林降水分配格局的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 460–468
- LEI L Q, ZHENG L, NONG Y, et al. Effects of rainfall characteristics on rainfall partitioning in *Castanopsis hystrix* plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 460–468
- [36] 王昱程. 冀北山地阔叶林对降雨再分配的影响[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(1): 107–110, 115
- WANG Y C. Effects of broad-leaved forest on rainfall redistribution in mountain land in northern Hebei Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 107–110, 115
- [37] 李成, 高鹏, 董学德, 等. 泰山麻栎人工林降雨截留特征及修正的Gash模型模拟[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(3): 31–38
- LI C, GAO P, DONG X D, et al. Canopy interception characteristics of *Quercus acutissima* plantation forest in Mountain Tai, China and its estimation by the revised Gash model[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(3): 31–38
- [38] 杜妍, 庄家尧, 周勇. 苏南丘陵区毛竹林林冠水文特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 308–314
- DU Y, ZHUANG J Y, ZHOU Y. Hydrological characteristics of the canopy of *phyllostachy edulis* forest in hilly areas of southern Jiangsu Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(3): 308–314
- [39] 袁秀锦, 肖文发, 雷静品, 等. 马尾松林分结构对冠层水文效应的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 451–459
- YUAN X J, XIAO W F, LEI J P, et al. Influence of stand structure of *Pinus massoniana* on canopy hydrological effect[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 451–459
- [40] 刘泽彬, 王彦辉, 邓秀秀, 等. 六盘山华北落叶松林下穿透雨空间变异特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3471–3481
- LIU Z B, WANG Y H, DENG X X, et al. Spatial variations of throughfall in a *Larix principis-ruprechtii* plantation of Liupan Mountains, Ningxia, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3471–3481
- [41] 黄承标, 梁宏温. 广西亚热带主要林型的树干茎流[J]. *植物资源与环境*, 1994, 3(4): 10–17
- HUANG C B, LIANG H W. Stemflow of main forest types in Guangxi subtropics[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1994, 3(4): 10–17
- [42] 艾长江, 高光耀, 袁川, 等. 陕北黄土高原柠条灌丛穿透雨特征与影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(17): 6063–6073
- AI C J, GAO G Y, YUAN C, et al. Throughfall and its influential factors of a typical xerophytic shrub (*Caragana korshinskii*) in northern Shaanxi in the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6063–6073
- [43] 陈倩, 周志立, 史琛媛, 等. 河北太行山丘陵区不同林分类型枯落物与土壤持水效益[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 206–211
- CHEN Q, ZHOU Z L, SHI C Y, et al. Litter and soil water-holding capacity of different typical forests in hilly region of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 206–211