

黑龙江西部半干旱区经济灌木冠层 降雨再分配特征

崔琳¹, 王力刚¹, 张玉柱¹, 方玉凤^{1,2}, 赵影³, 季晓慧¹, 司思¹

(1. 黑龙江省林业科学院齐齐哈尔分院 嫩江平原防护林国家长期科研基地 黑龙江松嫩平原农田防护林生态系统定位观测研究站, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 2. 黑龙江扎龙湿地生态系统定位观测研究站, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 3. 中国科学院 沈阳应用生态研究所 森林生态与保育重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: [目的] 探究黑龙江西部半干旱区不同灌木冠层降雨再分配特征, 为筛选利于半干旱地区水源涵养的经济灌木树种提供理论依据。[方法] 以平榛(*Corylus heterophylla*)、枸杞(*Lycium chinense*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、樱桃(*Prunus tomentosa*)、刺五加(*Eleutherococcus senticosus*)、刺玫果(*Rosa davurica*) 6 种经济灌木为研究对象, 通过 2023 年 6—9 月 15 次降雨的监测, 对比分析 6 种灌木林冠层降雨再分配差异及影响因素。[结果] 6 种灌木林冠层降雨分配差异显著($p < 0.05$), 超过 70% 的降雨以穿透雨形式降落。灌木冠层的穿透雨率(均值)、树干茎流率(均值)和冠层截留率(均值)分别为 71.47%~91.16% (82.14%), 2.31%~7.46% (4.40%), 6.56%~23.41% (13.65%); 冠层截留率表现为: 毛樱桃林 > 沙棘林 > 平榛林 > 刺玫果林 > 刺五加林 > 枸杞林。降雨量是影响灌木冠层降雨再分配过程的关键气象要素, 6 种灌木的穿透雨量、树干茎流量、冠层截留量均和林外降雨呈显著线性正相关($p < 0.01$), 穿透雨率、茎流率、截留率与林外降雨之间呈对数函数关系。气象因素、林分特征与冠层截留能力的相关性分析表明, 截留率和气温呈正相关($p < 0.05$)、与风速呈负相关($p < 0.01$); 除分枝数和穿透雨率不显著相关外, 其余林分特征与树干茎流率、冠层截留率均呈显著正相关, 与穿透雨率均呈显著负相关关系。[结论] 不同灌木冠层降雨分配存在差异性, 毛樱桃林、平榛林、沙棘林冠层的降雨截留率和茎流率较高, 在减少雨水击溅侵蚀, 涵养水源方面具有优势; 枸杞林、刺五加林、刺玫果林冠层的穿透雨率高, 在增加林冠下有效利用水分方面具有优势。气象因素与林分特征在灌木林冠层降雨再分配过程中均发挥重要作用。

关键词: 经济灌木; 降雨再分配; 穿透雨; 树干茎流; 冠层截留

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0025-11

中图分类号: S715, S727.2

文献参数: 崔琳, 王力刚, 张玉柱, 等. 黑龙江西部半干旱区经济灌木冠层降雨再分配特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 25-35. Cui Lin, Wang Ligang, Zhang Yuzhu, et al. Characteristics of rainfall redistribution of economic shrub canopies in west semiarid area of Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 25-35. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.029; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.029.

Characteristics of rainfall redistribution of economic shrub canopies in west semiarid area of Heilongjiang Province

Cui Lin¹, Wang Ligang¹, Zhang Yuzhu¹, Fang Yufeng^{1,2}, Zhao Ying³, Ji Xiaohui¹, Si Si¹

(1. National Permanent Scientific Research Base on Shelter forest in Nenjiang Plain, Heilongjiang Songnen Plain Farmland Shelterbelt Ecosystem Observation and Research Station, Qiqihar Branch of Heilongjiang Academy of Forestry, Qiqihar, Heilongjiang 161005, China; 2. Heilongjiang Zhalong Wetland Ecosystem Observation and Research Station, Qiqihar, Heilongjiang 161005, China; 3. CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Silviculture, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shengyang, Liaoning 110016, China)

Abstract: [Objective] The rainfall redistribution characteristics of different shrub canopies in the western semiarid

收稿日期: 2024-12-13

修回日期: 2025-02-25

采用日期: 2025-02-25

资助项目: 国家重点研发计划项目“东北黑土区旱地高标准农田建设关键技术集成与示范”(2024YFD1500200); 黑龙江省省属科研院所基本业务费项目(CZKYF2023q003); 黑龙江省省属科研院所业务费项目(CZKYF2025-1-C053)

第一作者: 崔琳(1988—), 女(满族), 吉林省桦甸市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事防护林建设方面的研究。Email: cuilinjin@126.com。

通信作者: 王力刚(1968—), 男(汉族), 黑龙江省海伦市人, 学士, 研究员级高级工程师, 主要从事防护林建设方面的研究。Email: wlg0415@126.com。

area of Heilongjiang Province were analyzed to provide a theoretical basis for selection of economically valuable shrub species that are conducive to water conservation in semi-arid regions. [Methods] Six economic shrubs with development potential in western Heilongjiang Province, namely *Corylus heterophylla*, *Lycium chinense*, *Hippophae rhamnoides*, *Prunus tomentosa*, *Eleutherococcus senticosus*, and *Rosa davurica*, were used as research objects. Fifteen rainfall events from June to September 2023 were monitored to compare and analyze the rainfall redistribution characteristics of the six shrubs and their influencing factors. [Results] Significant differences ($p < 0.05$) were observed in rainfall redistribution among the six shrub canopies, with over 70% of the rainfall falling as throughfall. The average throughfall, stemflow, and canopy interception rates were 71.47%—91.16% (82.14%), 2.31%—7.46% (4.40%), and 6.56%—23.41% (13.65%), respectively. *P. tomentosa* had the highest canopy interception rate, followed by *H. rhamnoides*, *C. heterophylla*, *R. davurica*, *E. senticosus*, and *L. chinense*. Rainfall amount was the key meteorological factor influencing the rainfall redistribution process. The throughfall, stemflow, and canopy interception of the six shrubs showed a significant positive linear correlation with external rainfall ($p < 0.01$), whereas the throughfall, stemflow, and interception rates exhibited a logarithmic relationship with the external rainfall. Correlation analysis among meteorological factors, stand characteristics, and canopy interception capacity indicated that the interception rate was positively correlated with temperature ($p < 0.05$) and negatively correlated with wind speed ($p < 0.01$). Except for the non-significant correlation between branch number and throughfall rate, other stand characteristics showed significant positive correlations with stemflow and canopy interception rates and significant negative correlations with throughfall rate. [Conclusion] There were differences in rainfall redistribution among the different shrubs. *P. tomentosa*, *C. heterophylla*, and *H. rhamnoides* had relatively high interception and stem flow rates, which are advantageous for reducing rainwater splash erosion and conserving water. *L. chinense*, *E. senticosus*, and *R. davurica* had high throughfall rates, which are advantageous for increasing the effective utilization of water under the canopy. Overall, meteorological factors and stand characteristics play important roles in shrub canopy interception processes.

Keywords: economical shrub; rainfall redistribution; throughfall; stemflow; canopy interception

植被在生态系统水文循环和水量平衡中发挥着重要作用,植被冠层通过对降雨的截留和缓冲,显著影响水分再分配和减缓雨滴动能,树干茎流和穿透雨则直接影响土壤水分的空间异质性分布^[1-4]。在干旱半干旱地区,灌木植物因其根系发达,可有效防止水土流失,是干旱区退化生态系统植被恢复的重要物种^[5-6]。近年随着对干旱区和半干旱区生态环境恢复认识的加深,灌木在水分运移过程中的重要角色逐渐被认可,更多针对灌木降雨再分配特征的研究也逐步开展。Yue Kai等^[7]通过对全球尺度研究数据整合,发现冠层截留、树干茎流和穿透雨的中值水平分别占总降雨的21.8%,3.2%和73.0%,且降雨分配在不同生物群落间存在差异;Sadeghi^[8]对伊朗半干旱地区灌木在叶片过渡状态期间降雨再分配的监测结果表明,树冠饱和点、冠层持水能力、自由穿透雨系数以及湿润冠层蒸发速率与平均降雨强度的比值,均与植被叶面积指数和冠层郁闭度的增减相关;An Jinxia^[9]对黄土高原典型旱生灌木柠条锦鸡儿和沙柳的观测发现,降雨量是影响降雨事件间降雨分配的最显著因素,降雨强度和持续时间则控制着降雨事件内的穿透雨和树干茎流变量。灌木冠层降雨

再分配通过动态而复杂的过程,影响着林分水量调控,维护林地的水源涵养能力^[10]。然而,当前大多研究的研究对象为固沙灌木^[3]、饲用灌木及城市园林植物^[11],研究区域也多为西北^[12]、华北干旱半干旱地区^[13],对于东北半干旱地区经济灌木的冠层截留研究相对较少。

黑龙江西部处于中国东北高纬度寒区,半干旱季风气候显著,年降水量时空分布不均^[14],是黑龙江省典型的生态脆弱区,也是林业生态工程的重点建设区域。灌木林尤其是经济灌木林建设,既能维护生态功能的稳定,又符合当前发展地区特色林业经济产业的需求。目前,针对经济灌木在该地区独特气候和地理条件下的降雨再分配研究仍然缺乏,鉴于气候条件和植被类型等诸多因素对林冠截留影响的时空差异,本文选取该地区具有发展潜力的经济灌木为研究对象,分析不同灌木林冠下降雨再分配过程,阐明不同灌木林冠截留规律,并系统探究灌木林冠层截留变化的影响因素,为进一步认识该区域灌木林冠层水文生态功能数量特征,筛选利于半干旱地区水源涵养的经济灌木树种提供数据支撑和经验参数。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究区位于黑龙江省齐齐哈尔市富拉尔基区的黑龙江省林业科学院齐齐哈尔分院试验基地,地理坐标为 47°8′33″—47°8′45″N, 123°23′35″—123°24′8″E, 总面积 60 hm², 平均海拔 152 m。该区地处松嫩平原西部, 属温带大陆性季风气候, 多风少雨, 年均温 2.0~2.5 ℃, 年均无霜期 122~151 d, 辐射充足, 雨热同季, 年辐射量为 459.8~501.6 kJ/cm², 日照时数为 2 600~2 900 h。属半干旱区域, 降雨分布季节性强, 主要集中在 6—9 月, 年均降雨量 450 mm, 年蒸发量 1 500~2 200 mm^[15]。

研究区引种栽植乔灌木植被 200 余种, 土壤类型主要为栗钙土。

1.2 试验材料选择

于 2023 年 6 月在试验区选取有代表性的 6 种经济灌木树种, 平榛 (*Corylus heterophylla*)、枸杞 (*Lycium chinense*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、樱桃 (*Prunus tomentosa*)、刺五加 (*Eleutherococcus senticosus*)、刺玫果 (*Rosa davurica*) 为研究对象, 分别设置 10 m×10 m 的标准样地, 充分考虑立地条件、生长发育阶段以及个体间的竞争状况, 每个样地选择 3 株具代表性的、长势相近单株, 共选择样木 18 株, 测定标准样木灌木的株高、冠幅、基径等基本信息, 调查基本情况详见表 1。

表 1 经济型灌木林分基本特征
Table 1 Basic characteristics of economical shrubs

灌木名	科属名	林龄/a	株高/m	冠幅/m	分支数	基径/mm	树冠投影面积/m ²
平榛	桦木科榛属	5	1.21±0.08 ^c	1.17±0.10 ^b	13.3±3.0 ^b	9.88±0.79 ^b	1.08±0.29 ^{bc}
枸杞	茄科枸杞属	5	1.08±0.14 ^c	0.88±0.17 ^b	9.6±1.7 ^{bc}	6.26±0.32 ^b	0.89±0.55 ^c
沙棘	胡颓子科沙棘属	15	3.35±0.21 ^a	2.07±0.16 ^a	1.0 ^c	42.35±2.89 ^a	3.32±0.81 ^{ab}
樱桃	蔷薇科李属	15	2.61±0.29 ^b	2.62±0.20 ^a	26.7±6.1 ^a	16.84±0.92 ^b	5.78±3.51 ^a
刺五加	五加科五加属	5	0.63±0.08 ^d	0.44±0.02 ^b	3.3±0.6 ^{bc}	6.73±0.53 ^b	0.16±0.03 ^c
刺玫果	蔷薇科蔷薇属	10	1.66±0.13 ^c	2.11±0.18 ^a	30.33±3.4 ^a	11.38±0.78 ^b	3.49±1.01 ^{ab}

注:①表中数值为平均值±标准差;②不同小写字母表示不同灌木树种间的差异显著($p<0.05$)。下同。

1.3 灌木截留能力测定

2023 年 6—9 月在试验区开展观测。降雨测定按次降雨事件计算, 降雨间隔小于 6 h 为 1 次降雨事件, 降雨结束后立刻测定, 夜间降雨第 2 天清晨测定, 尽量减少蒸发对观测造成的影响^[13]。林外降雨测定采用人工与自动测定结合的方法, 周边开阔空地布设 14 个自制雨量桶(直径 20 cm)观测。并用基地内长期固定气象站(RR-9100)自动观测的降雨数据作为校正, 同时气象站实时监测空气温度、风速等气象要素。林下穿透雨通过雨量桶收集, 在选定的 18 株样木下, 将雨量桶以灌木中心为圆心, 呈辐射状均匀放置于 4 个方位(行间角度为 90°), 根据灌木冠幅的大小差异, 每株样木设置 4~16 个雨量桶。选取树干茎流标准枝时, 参照庞维华等^[16]的方法, 依据枝条基径进行选择, 用锡箔纸及聚乙烯软管自制导流水槽装置测定茎干流体积。降雨结束后, 采用标准量筒(规格:1 000 ml, 最小分度值:5 ml)及 20 cm 雨量计专用量杯(规格:10 mm, 最小分度值:0.1 mm)测定穿透雨及树干茎流。采用如下公式^[17-18]计算灌木树干茎流量、冠层截留量。

$$S=\sum_{i=1}^N\frac{C_i\cdot M_i}{S_p\times 1\,000}$$

(1)

式中: S 为树干茎流量(mm); N 为枝干个数; C_i 为枝

条平均茎干流体积(ml); M_i 为单株枝干数; S_p 为植株的垂直投影面积(m²)。

$$I=P-(S_F+T_F)$$

(2)

式中: I 为冠层截留量(mm); P 为林外降雨量(mm); S_F 为茎流量(mm); T_F 为穿透雨量(mm)。

1.4 数据计算与处理

采用 LSD 最小显著性差异法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$); 采用回归分析拟合灌木的截留特征指标随降雨量的变化; 用相关分析研究气象因子、林分特征对冠层截留特征的影响。所有数据采用 Excel 2016 和 SPSS 22 软件进行统计分析, 利用 Excel 2016 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 观测期间林外降雨特征

林外降雨特征直接影响冠层截留和再分配特征^[4]。

本试验在 2023 年 6—9 月观测期间共记录有效降雨事件 15 次, 总累计降雨量 376.82 mm, 占该地区多年平均降雨量的 83.74%, 其中单次最大降雨量为 96.97 mm, 最小降雨量为 2.15 mm。依据降雨量等级划分, 降雨量为 <10 mm 的小雨发生频率为 5 次, 占有效降雨场次的 33.33%, 累计降雨量为 22.47 mm,

仅占总降雨量的 5.96%, 对总降雨量影响较小; 降雨量为 25.0~49.9 mm 的大雨发生频率同样为 5 次, 但其累计降雨量达到 187.73 mm, 占总降雨量的比例最大 (49.82%), 对总降雨量影响较大; 降雨量为 10.0~

24.9 mm 的中雨场次发生频率为 4 次, 占有效降雨场次的 26.67%, 累计降雨量为 69.69 mm; 降雨量为 50.0~99.9 mm 的暴雨场次仅有 1 次, 占总降雨量的 25.73%, 占有效降雨场次的 6.67% (图 1)。

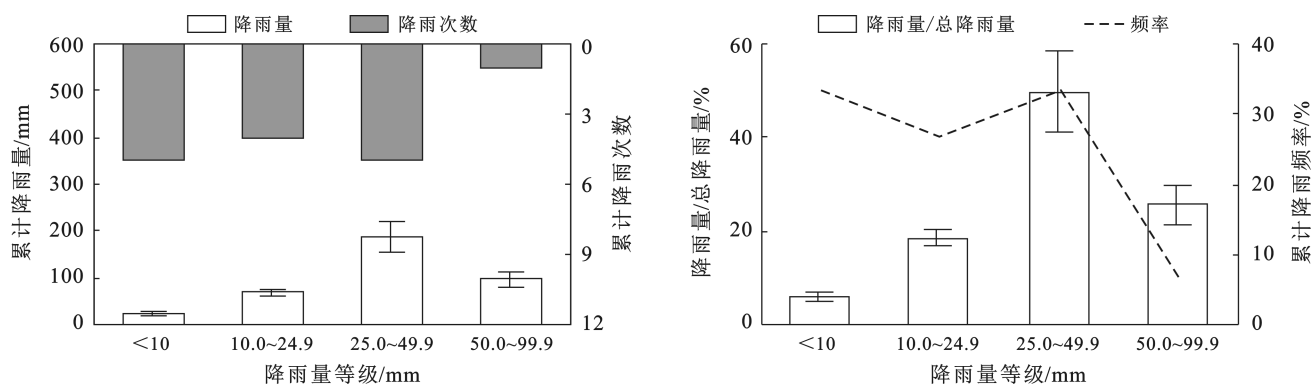


图 1 观测期间研究区降雨量分布

Fig.1 Rainfall distribution at study area during observation period

2.2 不同灌木林冠层降雨再分配特征

通过对观测的冠层截留特征数据进行整理分析可知 (表 2), 灌木林冠层降雨再分配情况整体表现为: 穿透雨量 > 冠层截留量 > 树干茎流量, 降雨主要以穿透雨形式降落, 不同灌木林树种之间 3 者分配比例有一定差别, 且截留特征指标之间存在显著差异 ($p < 0.05$)。6 种灌木林的穿透雨总量在 278.63 ~ 351.99 mm, 平均穿透雨量 319.39 mm; 穿透雨率变化范围为 71.47%~91.16%, 平均穿透雨率为 82.14%; 树干茎流量变化范围为 8.41 mm~35.31 mm, 平均树干茎流量为 18.14 mm, 树干茎流率变化范围为

2.31%~7.46%, 冠层截留量变化范围为 16.42~77.57 mm; 平均冠层截留量为 39.29 mm; 冠层截留率变化范围为 6.56%~23.41%, 平均冠层截留率为 13.65%。整体来看, 冠层降雨再分配量与分配率在不同灌木树种间差异表现一致, 枸杞林和刺五加林穿透雨量及穿透雨率显著高于其他灌木林 ($p < 0.05$); 树干茎流量和树干茎流率则与之相反, 枸杞林、刺五加林和刺玫果林显著低于其他灌木林 ($p < 0.05$), 沙棘林则表现最高; 冠层截留量和截留率最高为毛樱桃林, 显著高于其他灌木林 ($p < 0.05$), 枸杞林和刺五加林显著低于其他灌木林 ($p < 0.05$)。

表 2 不同灌木林冠层降雨再分配特征

Table 2 Rainfall redistribution characteristics of canopy interception in different shrubs

树 种	穿透雨量/mm	穿透雨率/%	树干茎流量/mm	树干茎流率/%	冠层截留量/mm	冠层截留率/%
平 榛	315.38±5.06 ^c	80.76±1.08 ^c	24.66±1.84 ^b	5.90±0.24 ^b	36.78±4.89 ^c	13.37±1.05 ^c
枸 杞	351.99±1.40 ^a	91.16±0.34 ^a	10.15±1.48 ^e	2.37±0.38 ^c	14.68±0.18 ^e	6.49±0.31 ^d
沙 棘	289.70±7.20 ^d	75.05±2.01 ^d	35.31±3.78 ^a	7.46±1.00 ^a	51.81±4.54 ^b	17.48±1.11 ^b
毛樱桃	278.63±0.90 ^e	71.47±1.14 ^e	20.61±3.97 ^b	5.85±1.08 ^b	77.57±3.78 ^a	23.41±1.47 ^a
刺五加	346.57±1.40 ^a	89.62±0.43 ^a	8.41±1.56 ^e	2.31±0.54 ^c	21.84±1.20 ^d	8.20±0.92 ^d
刺玫果	334.05±2.05 ^b	84.76±1.25 ^b	9.69±1.73 ^c	2.53±0.52 ^c	33.09±2.54 ^c	12.95±0.93 ^c

2.3 灌木林冠层截留与林外降雨关系

2.3.1 穿透雨与林外降雨关系 通过回归分析和曲线拟合, 6 种灌木林的穿透雨、穿透雨率随林外降雨量的变化如图 2 所示, 不同灌木林穿透雨量与林外降雨量之间呈显著线性相关 ($p < 0.01$), 穿透雨量随林外降雨量的增加而增加, 产生穿透雨的最小降雨量约为平榛林 0.60 mm, 枸杞林 0.30 mm, 沙棘林 0.40 mm, 毛樱桃林 0.8 mm, 刺五加林 0.30 mm, 刺玫果林 0.9 mm。6 种灌木林穿透雨量与林外降雨的拟合曲线斜率表

现为: 枸杞林 > 刺五加林 > 刺玫果林 > 平榛林 > 沙棘林 > 毛樱桃林。观测不同降雨量条件下, 6 种灌木林的穿透雨率分别为平榛林 69.02%~91.26%, 枸杞林 79.07%~97.07%, 平榛林 69.02%~91.26%, 枸杞林 79.07%~97.07%, 沙棘林 53.77%~83.16%, 毛樱桃林 54.15%~83.95%, 刺五加林 77.80%~96.37%, 刺玫果林 65.07%~95.63%, 变异系数表现为: 毛樱桃林 (9.84%) > 刺玫果林 (8.44%) > 平榛林 (6.90%) > 沙棘林 (6.77%) > 枸杞林 (4.71%) > 刺五加林

(4.62%),降雨量大小的差异对毛樱桃林的穿透雨率影响最大。不同灌木穿透雨率与林外降雨量呈对数函数关系,穿透雨率随降雨量增大而增加,在降雨量

达到一定等级后,穿透雨率趋于平缓,两者间关系显著($p<0.01$),但 R^2 值较低,这可能是由于穿透雨率受到风向、风速等气象条件影响。

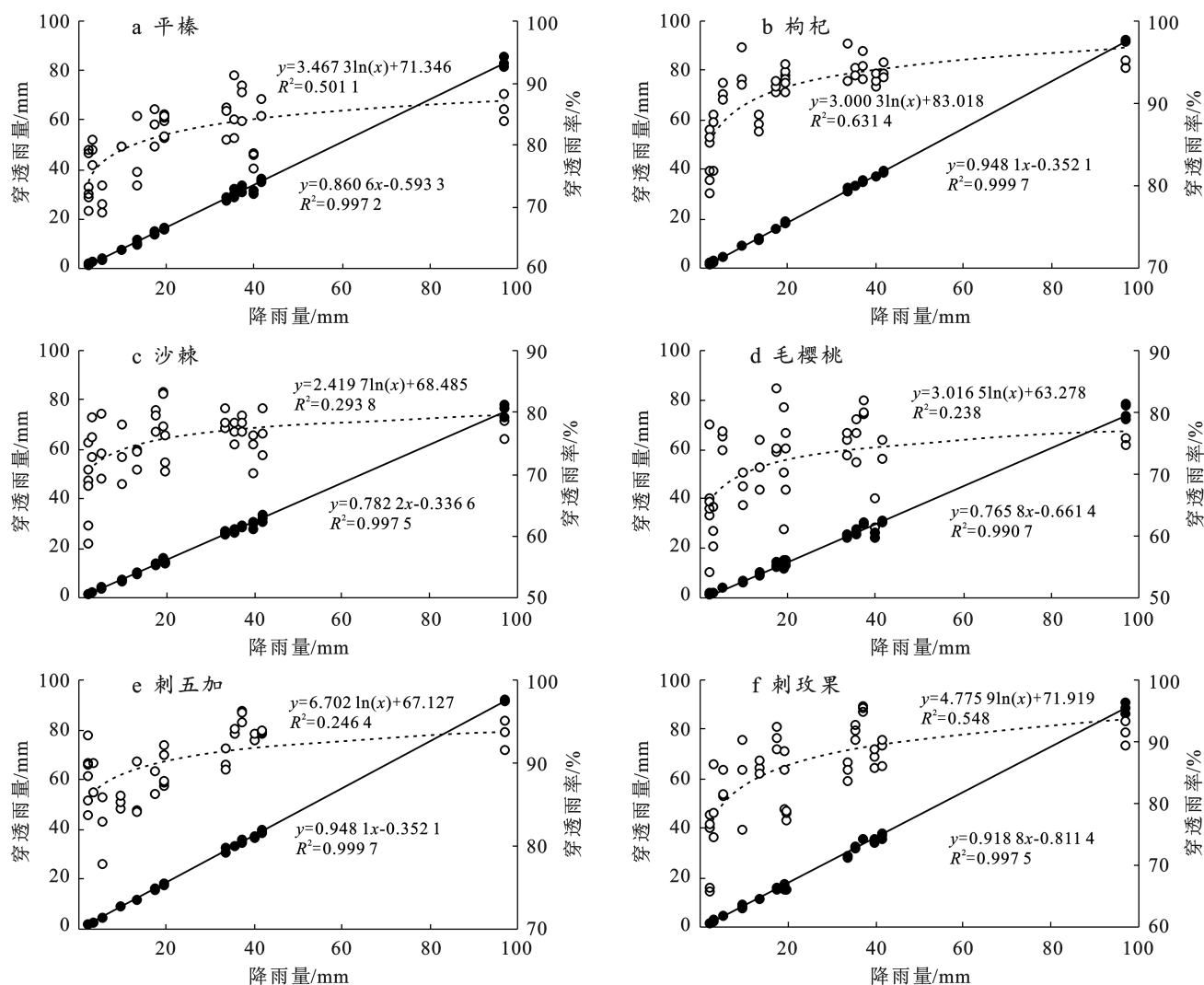


图2 不同灌木林穿透雨和林外降雨的关系

Fig.2 Relationship between throughfall and external rainfall in different shrubs

2.3.2 树干茎流与林外降雨关系 通过对6种灌木林的树干茎流和林外降雨进行回归分析和曲线拟合(图3),发现不同灌木林树干茎流量与林外降雨量之间呈极显著线性相关($p<0.01$),树干茎流量随林外降雨量的增大而增加,不同灌木林产生树干茎流的最小降雨量约为平榛林1.40 mm,枸杞林1.80 mm,沙棘林1.30 mm,毛樱桃林1.50 mm,刺五加林2.22 mm,刺玫果林1.90 mm。6种灌木林树干茎流量与林外降雨的拟合曲线斜率表现为:沙棘林>平榛林>毛樱桃林>枸杞林>刺玫果林>刺五加林。不同降雨量条件下,6种灌木林树干茎流率的变化范围分别为平榛林2.90%~9.14%,枸杞林1.32%~4.58%,沙棘林2.15%~19.59%,毛樱桃林2.87%~9.93%,刺五加林0.79%~6.04%,刺玫果林0.12%~8.97%,变异系

数表现为:刺玫果林(58.50%)>沙棘林(44.51%)>刺五加林(44.27%)>枸杞林(35.10%)毛樱桃林>(29.71%)>平榛林(20.85%)。树干茎流率与林外降雨之间呈对数函数关系,但相关性并不都显著,其中平榛林、沙棘林、毛樱桃林、枸杞林树干茎流率随降雨量增大而增加,而刺五加林和刺玫果林的树干茎流率则随降雨量的增大而减少。

2.3.3 冠层截留与林外降雨关系 试验期间,观测不同降雨量条件下,不同灌木林冠层截留率的变化范围分别为平榛林1.59%~26.32%,枸杞林0.81%~17.74%,沙棘林6.23%~33.84%,毛樱桃林8.30%~38.49%,刺五加林0.88%~18.02%,刺玫果林0.73%~34.29%,变异系数表现为:刺玫果林(64.15%)>枸杞林(63.18%)>刺五加林(61.28%)

>平榛林(48.87%)>沙棘林(39.26%)>毛樱桃林(37.15%),降雨量大小的差异,对灌木林的截留率影响较为明显。

对 6 种灌木林的冠层截留和林外降雨回归分析和曲线拟合的结果表明(图 4),不同灌木林冠层截留

量与林外降雨量之间呈极显著线性相关($p<0.01$),灌木林的冠层截留量均随林外降雨量的增大而增加,冠层截留率与林外降雨之间呈对数函数负相关关系,随着降雨量逐渐增大,冠层截留率逐渐减少并逐步趋近于稳定。

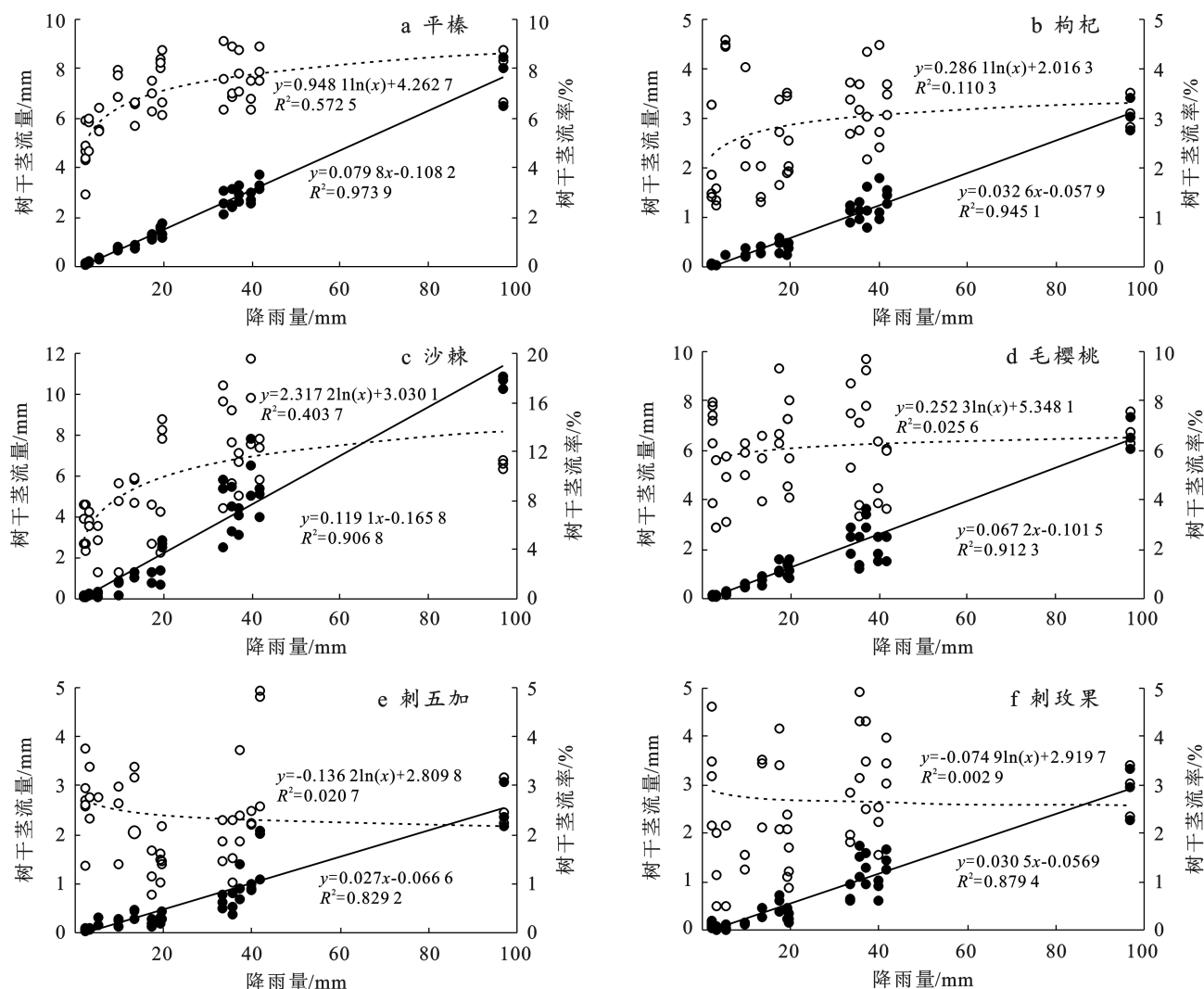


图 3 不同灌木林树干茎流和林外降雨的关系

Fig.3 Relationship between stemflow and external rainfall in different shrubs

2.4 气象因素、林分特征对降雨再分配特征的影响

本研究结果表明,降雨量是影响灌木降雨再分配特征的主要影响因素,穿透雨量、树干茎流量及冠层截留量均随林外降雨量增大而增大($p<0.01$),这与已有的研究结果一致。但除降雨量外,其他因素如气象因子、林分特征也对灌木林的截留特征有一定的影响。

将气象因子中的温度、风速,林分特征中的株高、基径、冠幅垂直投影面积、分枝数进行相关分析(表 3)。由表 3 可以看出,风速和温度与穿透雨率和树干茎流率无显著相关关系,但与冠层截留率显著相关,温度($p<0.05$)越高,风速($p<0.01$)越小,越有

利于灌木林的冠层截留。除分枝数和穿透雨率不显著相关外,其余林分特征与穿透雨率、树干茎流率、冠层截留率都显著相关,灌木林的穿透雨率和冠幅($p<0.01$)、基径($p<0.01$)、株高($p<0.01$)、垂直投影面积($p<0.01$)都极显著负相关;树干茎流率和冠幅($p<0.01$)、基径($p<0.01$)、株高($p<0.01$)、垂直投影面积($p<0.01$)、分枝数($p<0.05$)都显著正相关,冠层截留率和冠幅($p<0.01$)、基径($p<0.01$)、株高($p<0.01$)、垂直投影面积($p<0.01$)、分枝数($p<0.01$)都极显著正相关。冠层的截留率主要由林分特征决定,基径越粗、冠幅越大、株高越高,分枝数越多,灌木林的截留量越大。

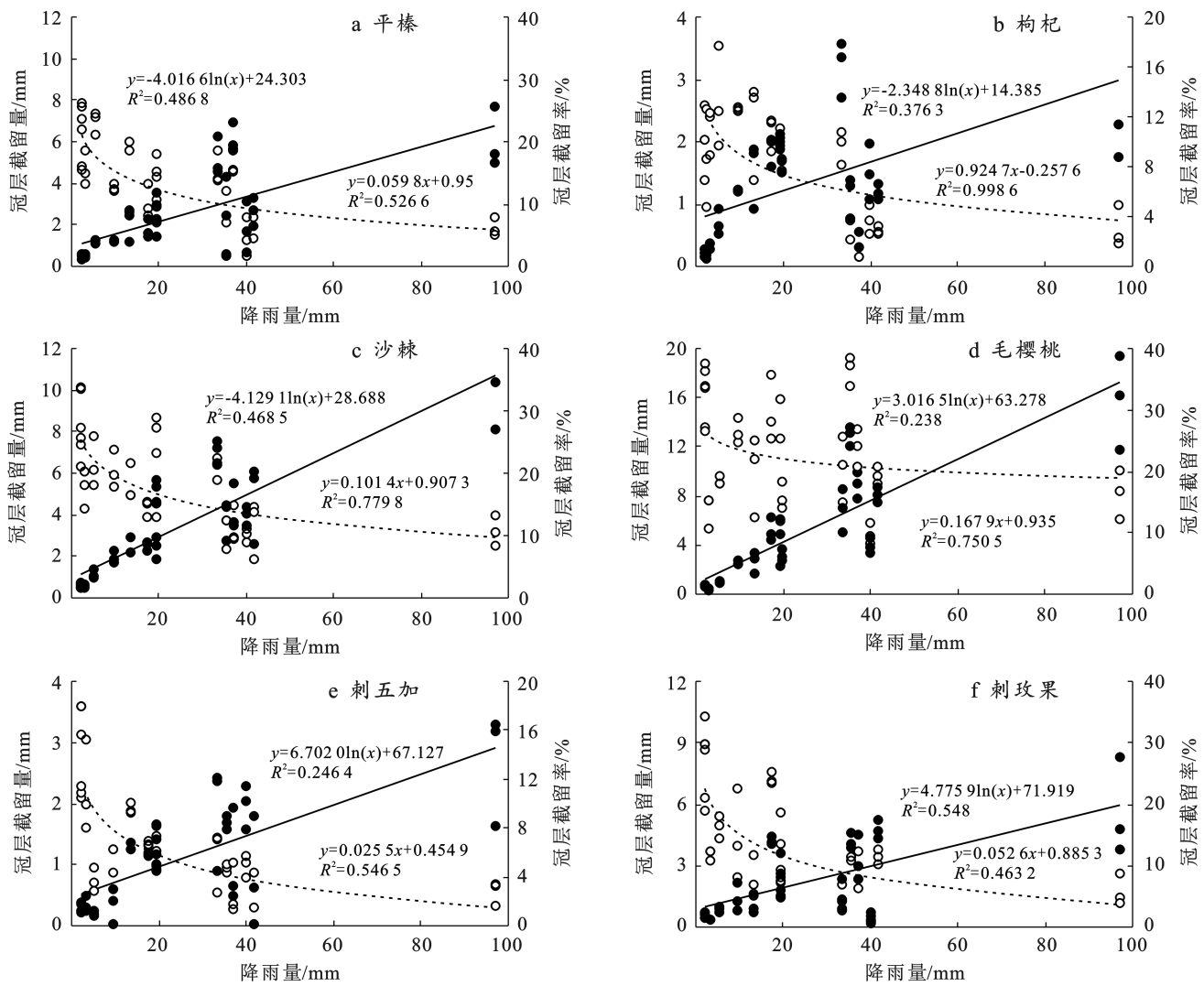


图 4 不同灌木林冠层截留和林外降雨的关系

Fig.4 Relationship between canopy interception and external rainfall in different shrubs

表 3 冠层截留和林分特征、气象因子相关分析

Table 3 Correlation analysis among canopy interception, morphological characteristics and meteorological factors										
指标	温度	风速	冠幅	基径	株高	垂直投影面积	分枝数	穿透雨率	树干茎流率	冠层截留率
温度	1									
风速	-0.464**	1								
冠幅	0	0	1							
基径	0	0	0.515**	1						
株高	0	0	0.818**	0.896**	1					
垂直投影面积	0	0	0.971**	0.446**	0.769**	1				
分枝数	0	0	0.644**	-0.291**	0.091	0.674**	1			
穿透雨率	-0.135	0.074	-0.664**	-0.547**	-0.678**	-0.644**	-0.115	1		
树干茎流率	-0.178	0.125	0.324**	0.501**	0.496**	0.299**	0.212*	-0.441**	1	
冠层截留率	0.215*	-0.280**	0.546**	0.362**	0.506**	0.580**	0.278**	-0.860**	0.068	1

注:**表示在 0.01 水平上显著,*表示在 0.05 水平上显著。

3 讨论

降雨作为植被生长发育补给水源的主要途径,经过冠层拦截后的再分配将直接影响冠层下可供植

被利用的有效水分,但由于特定地点或区域的因素使准确的量化变得更加复杂^[19-20]。因此,量化区域不同灌木林覆盖下穿透雨、树干茎流和冠层截留各组分比例,对进一步理解黑龙江西部半干旱区灌木对

降水再分配过程的调节及计算区域水文循环有一定的现实意义。

试验区观测期间观测降雨15次,累计降雨量达到376.82 mm,占该地区多年平均降雨量的83.74%,小雨、中雨、大雨的降雨次数接近,降雨等级分配(5次、4次、5次)较为平均,其中大雨累计降雨量达到187.73 mm,接近总降雨量的50%,暴雨虽然只发生1次,但降雨量达到96.97 mm,占总降雨量的25.73%。整体上降雨次数较少但降雨量较大。

3.1 不同灌木林降雨再分配特征

试验期间6种灌木林的冠层降雨再分配比例差异显著($p<0.05$),总体表现为:穿透雨量>冠层截留量>树干茎流量,6种灌木林均有超过70%的降雨以穿透雨形式降落,表明灌木冠层结构属性对冠层降雨再分配影响显著,这与以往研究^[21-22]结果一致。灌木林的穿透雨量、树干茎流量和冠层截留量变化范围分别为278.63~351.99 mm,16.42~77.57 mm,穿透雨率、树干茎流率和冠层截留率变化范围分别为71.47%~91.16%(82.14%),2.31%~7.46%(4.4%),6.56%~23.41%(13.65%)。与毛乌素沙地典型灌木羊柴(*Hedysarum mongolicum*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)和油蒿(*Artemisia ordosica*) (75.3%~80.7%,7.2%~11.1%,8.2%~17.7%)^[18],民勤荒漠绿洲过渡带多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)灌丛(81.72%,2.00%,16.28%)^[21],河西走廊泡泡刺灌丛(*Nitraria sphaerocarpa*) (87.89%,1.61%,10.50%)^[23]的灌木截留特征类似,而与青岛城市绿地灌木(33.3%~71.2%,5.3%~19.9%,10.0%~56.2%)^[11]降水再分配比例有所差异,冠层截留率与干旱半干旱地区灌木林截留率接近,和半湿润地区灌木林的截留率差异较大,表明区域和物种冠层结构的差异都会对截留产生较大影响。

本研究中,穿透雨率大小顺序表现为:枸杞林>刺五加林>刺玫果林>平榛林>沙棘林>毛樱桃林。枸杞林、刺五加林显著高于其他灌木林($p<0.05$),相较于其他灌木林二者分枝少,冠幅小,叶片稀疏,对降雨的拦截作用较弱,穿透雨率较高;毛樱桃叶片大而密,冠幅大分枝多,沙棘叶片小而多,密集互生,二者都有枝叶密集的冠层,雨水难以穿透树冠,穿透雨率较低。已有研究^[24]结果表明,森林生态系统的树干茎流率比例为0%~20.00%(平均值为3.1%),而灌木生态系统的树干茎流率比例为0%~49.30%(平均值为6.7%),不同植被类型、气候条件、区域的树干茎流率存在显著差异。本研究中树干茎流率表现为:沙棘林(9.32%)>平榛林(6.83%)>

毛樱桃林(6.03%)>枸杞林(2.79%)>刺玫果林(2.71%)>刺五加林(2.44%)。沙棘林的树干茎流率显著高于其他灌木林($p<0.05$),在相同降雨条件下,沙棘通过茎干汇流到灌木根部的水分最多,可能是由于6种灌木中仅沙棘是有主干灌木,树干笔直,利于汇集和传输雨水,表明有主枝的灌木树干茎流汇集作用要显著强于多分枝灌木;而刺五加林、枸杞林、刺玫果林三者均显著低于其他灌木林($p<0.05$),刺五加、刺玫果分枝密生刺,打断茎流传输连续性,增大了茎流传输难度,枸杞枝条细弱,分枝角大,冠层水分难以汇集于分枝,可能是导致上述灌木林树干茎流率低的原因。冠层截留率表现为:毛樱桃林>沙棘林>平榛林>刺玫果林>刺五加林>枸杞林。冠层截留主要受到叶片吸水能力影响和冠幅影响,叶片吸水性越大,冠幅大、分枝角小的灌木植被截留量越大^[8,13],本研究中的截留率也符合上述结论。

上述灌木林冠层降雨再分配比例结果表明,毛樱桃、平榛、沙棘叶片紧密,冠幅大,能够更好地截留降雨,同时茎流量较高,能够增加植被根系土壤水分,在减少雨水击溅侵蚀,涵养水源方面有优势,适于在丘陵地带、有水土流失风险的地区栽植,枸杞、刺五加、刺玫果具有较高的穿透雨率,冠层截留量较低,在减少冠层水分净损失,增加林冠下有效利用水分方面有优势,适合在降水稀少的沙区栽植。

3.2 灌木林降雨再分配与林外降雨的关系

降雨特征是影响灌木林冠层降水再分配过程的关键气象要素^[13,25]。研究发现不同灌木林对降雨特征表现出的变化趋势一致,通过回归分析和曲线拟合,6种灌木林的穿透雨量、树干茎流量、冠层截留量均和林外降雨呈显著线性正相关($p<0.01$),随林外降雨量的增大而增大,但斜率有所差异,表明相同的降雨量对不同灌木林雨水再分配的影响速率有一定差异。不同降雨条件下,6种灌木林的穿透雨率、茎流率和截留率的变异系数分别为4.62%~9.84%,20.85%~58.50%,37.15%~64.15%,降雨量的大小差异对截留率的影响最大,这与王甜甜等^[18]得出的毛乌素沙地3种典型灌木降雨再分配单次茎流量和截留量差异较大,而穿透雨量差异较小的结论一致。其中刺玫果林的穿透雨率(8.44%)、茎流率(58.50%)和截留率(64.15%)的变异系数均较大,表明刺玫果冠层对不同降雨量条件下降水截留的响应是最显著的,这可能和刺玫果枝叶较为密集,分枝多,且分枝密生刺有关。

以往的研究^[26]多用对数方程模拟穿透雨率、茎流率和截留率和林外降雨的关系,本研究同样采取

对数函数拟合,拟合曲线较好地反映了不同灌木林穿透雨率、茎流率、截留率和林外降雨之间的关系及不同灌木林的差异性。不同灌木林穿透雨率随降雨量增大而增加,在降雨量达到一定等级后,穿透雨率趋近于平缓,两者间关系显著($p < 0.01$),降雨初始雨水先经过冠层截留叶片、枝干吸水,穿透雨率较低,随着降雨量增大,叶片、枝干吸水逐步饱和,林冠层对降雨的吸收作用逐步减少,穿透雨率增大。树干茎流率则表现为刺五加林和刺玫果林的茎流率与林外降雨负相关,和其他灌木林呈正相关,正常情况下随着降雨量增大,茎流逐步形成汇流,茎流率逐步增大,刺五加和刺玫果则因为分枝上密生刺,雨水的蓄积无法形成汇流茎流。截留率和林外降雨呈负相关,截留能力随着降雨量增大逐渐饱和,当超出冠层持水能力的时候,雨水就转化为穿透雨和树干茎流,导致截留率逐步减小并趋于稳定^[23]。

3.3 灌木林降雨再分配影响因素

冠层降雨再分配作为森林生态系统水量平衡的重要过程,具有一定的动态性及复杂性,其影响因素主要包含气象因素:降雨量、雨强、降水历时、气温、湿度、风速等;植被特征因素:林分密度、树种组成、林龄、基径、枝叶形态、分枝数、枝长、分枝角、枝粗糙度等^[27-29]。以往的研究表明,气象因子中的降雨量是直接影响植被冠层截留的主要因素,本研究中降雨量与截留特征的各项指标都呈显著相关关系。此外,研究表明气温降低会减缓植物蒸腾,风速越大越会改变植被的机械运动,植被摇动加速雨滴转化为穿透雨,导致冠层截留降低,符合前文中风速与冠层截留率显著负相关($p < 0.01$),气温与冠层截留率显著正相关($p < 0.05$)。植被特征是除气象因素外,影响冠层截留的另一个重要因素。6种灌木植被特征中,除分枝数和穿透雨率不显著相关外,其余林分特征与穿透雨率、树干茎流率、冠层截留率都显著相关。多数研究^[19]认为,冠层的体积、面积、高度,基径、枝长、枝倾角、枝叶干燥度和持水能力,叶片形状、面积、倾角、散射系数、透射系数等都是冠层截留的主要因子,本研究结果同样表明冠层截留率主要由林分特征决定,基径越粗、冠幅越大、株高越高,分枝数越多,灌木的截留量越大。

4 结 论

(1) 本研究通过对6种经济灌木林冠层降雨再分配特征分析,结果表明不同灌木林的冠层降雨再分配比例差异较大,均以穿透雨为主。毛樱桃林、平榛林、沙棘林冠层穿透雨量较低,截留量和茎流量较

高,可栽植于丘陵地带、有水土流失风险的地区;枸杞林、刺五加林、刺玫果林与之相反,适合栽植于降水稀少的沙区。

(2) 不同灌木林对降雨特征表现出的变化趋势一致,穿透雨量、树干茎流量、冠层截留量均和林外降雨量呈线性函数关系($p < 0.01$),穿透雨率、茎流率、截留率和林外降雨量之间呈对数函数关系,降雨量的大小差异对截留率的影响最大。6种灌木林中刺玫果冠层对不同降雨量条件下降水截留的响应是最显著的。

(3) 除降雨量外,气温、风速及植被特征也是影响灌木林冠层降雨再分配过程的重要因素,冠层截留率与风速呈显著负相关关系($p < 0.01$),与温度呈显著正相关关系($p < 0.05$),灌木的基径越粗、冠幅越大、株高越高,分枝数越多,截留量越大。

参考文献(References)

- [1] 吕刚,王磊,张卓,等.辽西低山丘陵区不同年龄荆条冠层截留降雨模拟实验研究[J].生态学报,2019,39(17):6372-6380.
Lü Gang, Wang Lei, Zhang Zhuo, et al. Simulated and experimental study on rainfall interception of different aged *Vitex negundo* var. *heterophylla* canopies in the low mountains and hills of western Liaoning [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6372-6380.
- [2] 徐先英,严平,郭树江,等.干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征[J].中国沙漠,2013,33(1):141-145.
Xu Xianying, Yan Ping, Guo Shujiang, et al. The interception loss of rainfall by three sand-fixing shrubs at the fringe of Minqin oasis [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 141-145.
- [3] 王甜甜,朱林,赵学琳,等.三种典型固沙灌木的降雨再分配特征[J].干旱区资源与环境,2021,35(8):100-107.
Wang Tiantian, Zhu Lin, Zhao Xuelin, et al. Rainfall redistribution characteristics of three typical sand-fixing shrubs [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(8): 100-107.
- [4] 黄家辉,刘苑秋,许青,等.不同降雨强度下庐山日本柳杉林冠层穿透雨延滞效应[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(1):29-36.
Huang Jiahui, Liu Yuanqiu, Xu Qing, et al. Time lag effects of throughfall on the canopy of *Cryptomeria Japonica* in Lushan Mountain, China under different rainfall intensity [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(1): 29-36.
- [5] 陈文,王桔红,朱慧,等.沙埋对河西走廊4种旱生植物种子萌发和幼苗生长的影响[J].中国沙漠,2015,35(6):1532-1537.

- Chen Wen, Wang Juhong, Zhu Hui, et al. Effect of sand burial on seed germination and seedling growth of four xeromorphic species in the Hexi Corridor [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(6):1532-1537.
- [6] 石梅莉. 干旱半干旱荒漠区灌木植物多样性研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2019.
- Shi Meili. Shrub diversity in arid and semi-arid desert areas [D]. Beijing: Central University for Nationalities, 2019.
- [7] Yue Kai, De Frenne P, Fornara D A, et al. Global patterns and drivers of rainfall partitioning by trees and shrubs [J]. Global Change Biology, 2021, 27(14): 3350-3357.
- [8] Sadeghi S M M, Van Stan J T, Pypker T G, et al. Importance of transitional leaf states in canopy rainfall partitioning dynamics [J]. European Journal of Forest Research, 2018, 137(1):121-130.
- [9] An Jinxia, Gao Guangyao, Yuan Chuan, et al. Inter- and intra-event rainfall partitioning dynamics of two typical xerophytic shrubs in the Loess Plateau of China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26(14): 3885-3900.
- [10] 陈靖天. 东北黑土区侵蚀沟治理灌木种类筛选及栽植技术研究[D]. 吉林 长春: 东北师范大学, 2021.
- Chen Jingtian. Study on selection planting techniques of shrub species for erosion gully management in black soil area of northeast China [D]. Changchun, Jilin: Northeast Normal University, 2021.
- [11] 李海防, 俞洁蕾, 邵西宁, 等. 半湿润地区城市绿地灌木的截留集水功能及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2022, 33(5):1363-1369.
- Li Haifang, Yu Jielei, Shao Xining, et al. Canopy interception and water harvesting function of shrubs in urban green spaces of semi-humid region and their influencing factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(5):1363-1369.
- [12] 荐圣淇. 黄土高原典型灌木树干茎流特征及其生态水文效应[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2013.
- Jian Shengqi. Characteristics of stem flow of typical shrubs in Loess Plateau and its eco-hydrological effect [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2013.
- [13] 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 Tianmiao, Yang Hui, Cao Jiansheng. Rainfall redistribution of different vegetations in Taihang Mountain, China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(9):1471-1481.
- [14] M. Hassanien M, 黄金柏, 王斌, 等. 黑龙江西部半干旱区干旱特性评估[J]. 水文, 2021, 41(4):95-101, 108.
- Mahmoud M H, Huang Jinbai, Wang Bin, Assessment of drought characteristics for the semiarid western Heilongjiang Province [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4):95-101, 108.
- [15] Hassanien H A M M. 1961—2015 年黑龙江省西部半干旱区气候变化评估[D]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2022.
- Hassanien H A M M. Temporal climate change assessment in semiarid western Heilongjiang during 1961—2015 [D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2022.
- [16] 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 Weihua, Sun Yajie, Liu Jianjun. Canopy interception ability of different types of garden plant communities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4):49-55.
- [17] 田娜, 古君龙, 杨新国, 等. 荒漠草原中间锦鸡儿冠层截留特征[J]. 生态学报, 2019, 39(14):5279-5287.
- Tian Na, Gu Junlong, Yang Xinguo, et al. Characteristics of canopy interception by *Caragana intermedia* in desert grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14):5279-5287.
- [18] 王甜甜. 毛乌素沙地三种典型灌木的冠层降雨再分配特征及其影响因素[D]. 宁夏 银川: 宁夏大学, 2021.
- Wang Tiantian. Traits and influencing factors of rainfall redistribution of three typical shrubs canopy in the Mu Us sandy land [D]. Yinchuan, Ningxia: Ningxia University, 2021.
- [19] 牛小桃. 水蚀风蚀交错区典型植被叶面积指数动态变化及其对冠层截留量的影响[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2019.
- Niu Xiaotao. The dynamics of leaf area index of typical vegetation and its effect on canopy interception in water-wind erosion crisscross region [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [20] Hu Xu, Fu Zhaoqi, Sun Ge, et al. Importance of forest stand structures for gross rainfall partitioning on China's Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2024, 631: 130671.
- [21] 刘斐耀, 尤全刚, 薛娴, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带多枝柽柳冠层降水再分配特征及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(11):168-178.
- Liu Feiyao, You Quangang, Xue Xian, et al. Characteristics of rainfall redistribution in *Tamarix ramosissima* shrub in Minqin desert-oasis ecotone and the influencing factors [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(11):168-178.
- [22] Chen Xiaoying, Chen Lin, Yang Xinguo, et al. Rainfall partitioning characteristics by two sand-binding shrubs and their impact on shallow soil moisture replenishment in the northwestern desert steppe of China [J]. Ecohydrology, 2024, 17(5):e2652.

- [23] 赵文玥,吉喜斌,金博文,等.西北干旱区泡泡刺灌丛的降雨再分配特征及影响因素分析[J].生态学报,2022,42(2):804-817.
Zhao Wenyue, Ji Xibin, Jin Bowen, et al. Rainfall partitioning patterns of the desert shrub *Nitraria sphaerocarpa* and its influencing factors in drylands of northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(2):804-817.
- [24] 马孟良,李强,王疆尧,等.中国旱区森林生态系统的林冠截留综述[J].西北林学院学报,2024,39(5):1-13.
Ma Mengliang, Li Qiang, Wang Jiangyao, et al. A review of canopy interception of forest ecosystems in drylands of China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(5):1-13.
- [25] 韩青池,裴志永,孙小添,等.库布其沙漠人工沙柳灌丛降雨再分配特征及其抚育时间的影响[J].生态学报,2024,44(19):8661-8674.
Han Qingchi, Pei Zhiyong, Sun Xiaotian, et al. Investigation of rainfall redistribution characteristics in artificial *Salix psammophila* shrub plantations in the Kubuqi Desert and the impact of different management durations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(19):8661-8674.
- [26] 马剑,刘贤德,金铭,等.祁连山西水林区灌木林降雨截留特征[J].水土保持研究,2017,24(3):363-368.
Ma Jian, Liu Xiande, Jin Ming, et al. Characteristics of rainfall interception by shrubs in Xishui forest district of Qilianshan Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(3):363-368.
- [27] 张雪.祁连山东段典型灌丛降雨再分配特征研究[D].甘肃兰州:甘肃农业大学,2021.
Zhang Xue. Study on rainfall redistribution characteristics of typical shrubs in the eastern section of Qilian Mountains [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2021.
- [28] 李海防,俞洁蕾,邵西宁,等.半湿润地区6种常用灌木对降雨截留的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(6):83-93.
Li Haifang, Yu Jielei, Shao Xining, et al. Effects of six shrub species in semi-humid region on the rainfall interceptions [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(6):83-93.
- [29] Xiao Qingfu, McPherson E G, Ustin S L, et al. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California [J]. Hydrological Processes, 2000,14(4):763-784.
- ~~~~~
- (上接第9页)
- [26] 乐易迅,胡敏杰,肖琳,等.河口湿地红树林植被恢复对土壤养分动态的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):333-337.
Le Yixun, Hu Minjie, Xiao Lin, et al. Effects of mangrove vegetation restoration on soil nutrient dynamics in estuarine wetlands [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):333-337.
- [27] 赵燕波,纪托末,张丹桔,等.3个树种与巨桉混交土壤理化性质、凋落物量和养分含量特征[J].应用与环境生物学报,2015,21(5):948-953.
Zhao Yanbo, Ji Tuowei, Zhang Danju, et al. Soil physicochemical properties, biomass and nutrient contents of forest litter in mixed plantations of *Eucalyptus grandis* and three tree species [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015,21(5):948-953.
- [28] 潘玉梅,张乃莉.亚热带森林树种多样性对凋落叶分解胞外酶活性的影响[J].生物多样性,2021,29(11):1447-1460.
Pan Yumei, Zhang Naili. Effects of tree diversity on enzyme activity in litter of a subtropical forest ecosystem [J]. Biodiversity Science, 2021,29(11):1447-1460.
- [29] 韩翠,康扬眉,余海龙,等.降水量对4种荒漠草原植物凋落物碳氮磷释放的影响[J].生态学报,2022,41(6):1090-1100.
Han Cui, Kang Yangmei, Yu Hailong, et al. Effects of precipitation on the release of carbon, nitrogen, and phosphorus from decomposing litter of four plant species in a desert steppe [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(6):1090-1100.
- [30] 张晓曦,胡嘉伟,王丽洁,等.不同林龄刺槐林地凋落物分解及养分释放对氮沉降的响应差异[J].植物资源与环境学报,2021,30(6):10-18.
Zhang Xiaoxi, Hu Jiawei, Wang Lijie, et al. Response differences in decomposition and nutrient release of litter from *Robinia pseudoacacia* plantations with different stand ages to nitrogen deposition [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2021,30(6):10-18.
- [31] 涂利华,胡红玲,胡庭兴,等.华西雨屏区亮叶桦凋落叶分解对模拟氮沉降的响应[J].植物生态学报,2012,36(2):99-108.
Tu Lihua, Hu Hongling, Hu Tingxing, et al. Response of *Betula luminifera* leaf litter decomposition to simulated nitrogen deposition in the rainy area of west China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012,36(2):99-108.
- [32] 张前进,白中科,郝晋珉,等.黄土区大型露天煤矿排土场景观格局分析:以平朔矿区为例[J].山西农业大学学报(自然科学版),2006,26(4):317-320.
Zhang Qianjin, Bai Zhongke, Hao Jinmin, et al. Landscape pattern analysis of dumping large opencast coal mine within loess area [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2006,26(4):317-320.