

DOI: 10.20103/j.stxb.202402170342

韩青池, 裴志永, 孙小添, 韩兆敏, 王海超, 刘文娟, 朱心宇, 张世纪, 张钧尧, 王伟龙. 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. 生态学报, 2024, 44(19): 8661-8674.

Han Q C, Pei Z Y, Sun X T, Han Z M, Wang H C, Liu W J, Zhu X Y, Zhang S J, Zhang J Y, Wang W L. Investigation of rainfall redistribution characteristics in artificial *Salix psammophila* shrub plantations in the Kubuqi Desert and the impact of different management durations. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8661-8674.

# 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

韩青池<sup>1</sup>, 裴志永<sup>1,\*</sup>, 孙小添<sup>1</sup>, 韩兆敏<sup>2</sup>, 王海超<sup>1</sup>, 刘文娟<sup>1</sup>, 朱心宇<sup>1</sup>, 张世纪<sup>1</sup>, 张钧尧<sup>1</sup>, 王伟龙<sup>1</sup>

1 内蒙古农业大学能源与交通工程学院, 呼和浩特 010018

2 内蒙古自治区林业和草原监测规划院, 呼和浩特 010020

**摘要:** 植被的降水再分配过程在维护林分水文循环及开展区域林水调控等方面发挥着重要作用。然而, 当前研究主要集中于探讨同质同龄林降雨特征对降水再分配的效应影响, 对于林分内部不同抚育时间下降雨再分配差异分析相对缺乏, 这对科学评估每 4—6 年即需平茬的灌木林分降水调配带来困难。对此, 以库布齐沙漠鄂尔多斯造林总场内 2a、3a 和 5a 沙柳林为研究对象, 同步监测计算不同抚育时间下沙柳降水分配特征, 分析其内部降雨分配差异及影响因素, 并根据区域林分分配、抚育时间与平茬期进行综合分析, 对未来 5 年林分降水再分配进行预测。结果表明: (1) 不同抚育时间下沙柳穿透雨表现为  $2a > 3a > 5a$  的变化趋势, 树干茎流与冠层截留则表现为  $5a > 3a > 2a$  的变化趋势, 降雨量与降雨历时是影响降雨再分配的关键因素。(2) 穿透雨空间分布特征受到植被抚育时间与降雨特征双重影响, 当雨量为小雨时, 2a 沙柳“雨极”、“中间极”与“旱极”分界均匀, 3a 沙柳穿透雨率空间分布较统一; 当雨量为大雨时, 2a 沙柳穿透雨率空间分布较统一, 3a 和 5a 沙柳“雨极”与“中间极”分界相对更明显。(3) 通过对当年林分降雨进行综合计算, 发现当年降水再分配的综合评估值与 3a 沙柳最相近。通过区域林分分配、抚育时间与平茬期综合对未来 5 年林地降水再分配进行预测, 建议于 2025 年在沙柳丛内混植小型林下植被, 以确保在 2026、2027 年等预估穿透雨量较大年份同具防沙固土与植被生长双重效益。此外, 研究发现每年降雨再分配格局主要贴近中林龄林分, 故而不方便进行林龄差异处理时, 优先选择中龄林分进行研究, 以减少抚育时间差异干扰。结果以期对开展水源涵养研究的林分林龄选择提供理论指导, 为世界其他地区开展林水资源调控与灌木防护林建设提供科学依据。

**关键词:** 不同抚育时间; 降雨再分配; 空间分布特征; 预测评估

## Investigation of rainfall redistribution characteristics in artificial *Salix psammophila* shrub plantations in the Kubuqi Desert and the impact of different management durations

HAN Qingchi<sup>1</sup>, PEI Zhiyong<sup>1,\*</sup>, SUN Xiaotian<sup>1</sup>, HAN Zhaomin<sup>2</sup>, WANG Haichao<sup>1</sup>, LIU Wenjuan<sup>1</sup>, ZHU Xinyu<sup>1</sup>, ZHANG Shiji<sup>1</sup>, ZHANG Junyao<sup>1</sup>, WANG Weilong<sup>1</sup>

1 College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2 Forestry and Grassland Monitoring and Planning Institute of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China

**Abstract:** Vegetation significantly influences the redistribution of precipitation, which is crucial for maintaining

**基金项目:** 国家自然科学基金(52069018); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021BS03019); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2023QN03029)

**收稿日期:** 2024-02-17; **网络出版日期:** 2024-07-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: peizhiyong@imau.edu.cn

hydrological cycles in forests and managing regional forest–water interactions. However, current research primarily examines the impact of homogeneous, even-aged forest characteristics on precipitation redistribution, with limited focus on the variability in rainfall redistribution at different forest management stages. This oversight complicates the scientific assessment of shrub forests, which are typically coppiced every four to six years. Consequently, this study focuses on *Salix psammophila* plantations within the Ordos afforestation area in the Kubuqi Desert, specifically aged 2, 3, and 5 years, to monitor and calculate precipitation redistribution characteristics at various growth stages. It analyzes internal differences in rainfall distribution and influencing factors, incorporating regional forest distribution, nurturing time, and coppicing intervals. Future projections for the next five years of forest precipitation redistribution are also developed. Results indicate: (1) Throughfall demonstrates a trend of 2a>3a>5a forests, while stemflow and canopy interception show a reverse trend of 5a>3a>2a forests, with rainfall amount and duration being key influencing factors. (2) The spatial distribution of throughfall is affected by both forest age and rainfall characteristics; during light rain, the 2a *Salix psammophila* forest exhibits even boundaries between "rain extremes," "middle extremes," and "dry extremes," while the 3a *Salix psammophila* shows a more uniform throughfall rate; during heavy rain, the 2a *Salix psammophila* maintains a more uniform rate, whereas the 3a and 5a *Salix psammophila* display more pronounced distinctions between "rain extremes" and "middle extremes." (3) Comprehensive calculations of rainfall distribution within the forest for the year closely match the assessments for the 3a *Salix psammophila*. The research forecasts the patterns of rainfall redistribution over the coming five-year period and advocates for the strategic integration of small-scale understory vegetation within the *Salix psammophila* plantations by 2025. This approach is projected to yield dual advantages, namely sand stabilization and enhanced vegetation growth during periods of substantial rainfall infiltration, particularly anticipated in the years 2026 and 2027. Additionally, the study highlights that the annual patterns of rainfall redistribution exhibit a strong correlation with forests of intermediate age. Consequently, it suggests prioritizing research efforts on these middle-aged forests to effectively minimize disruptions caused by variations in forest age. These insights are crucial as they provide theoretical guidance for selecting appropriate forest ages for water conservation research. Furthermore, the findings serve as a robust scientific foundation for the management of forest water resources and the development of protective shrub forests in diverse geographic regions across the globe.

**Key Words:** different forest ages; rainfall redistribution; spatial distribution characteristics; predictive assessment

植被降水再分配是指植被通过捕获、拦截、储存和释放降雨的过程,对于区域林水稳定及水文循环维护具有重要影响。雨水落到植被上被冠层分割成穿透雨、树干茎流和冠层截留三部分<sup>[1–2]</sup>,其中穿过植被冠层落到土壤的雨水被称为穿透雨<sup>[3]</sup>;沿着叶片、顺着茎干向下流动,最终汇集到植被根部的雨水被称为树干茎流<sup>[4–5]</sup>;还有部分降雨被截留在冠层表面,小部分作为叶片持水,大部分在降雨结束后蒸发损失,这部分雨水为冠层截留<sup>[6]</sup>。植被通过对降水的再分配作用以调节雨水归属,影响林地水分渗透与储存。穿透雨直接影响植被表层土壤的水分分布<sup>[7]</sup>,增加了植被土壤水分供应;树干茎流通过在根系汇集,维系水分供应,调控植被根部土壤水分的垂直分布<sup>[8–9]</sup>;冠层截留使到达地面的净水分通量明显减少,土壤水分在空间上发生异质性分布,并通过截留蒸腾作用,影响着局部大气湿度。植被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。

植被降雨再分配受到地下结构<sup>[10–11]</sup>、降雨特征<sup>[12–13]</sup>、当地微气候<sup>[14–15]</sup>等因素影响。研究表明,林外降雨特征(降雨量、降雨历时及降雨强度)是降雨再分配核心影响因素<sup>[16–17]</sup>之一。随着降雨量增大,穿透雨量、树干茎流量与冠层截留量均呈明显增大趋势<sup>[18–19]</sup>。此外,降雨持续时间增长与雨水间隔时间缩短,也使穿透雨量、树干茎流与林冠截留量表现出递增变化<sup>[20–22]</sup>。然而,降雨特征与降水分配的相关关系并不统一,有的呈线性关系,有的呈非线性关系(如幂函数关系、对数函数关系等),甚至有的关系并不明显<sup>[23–24]</sup>,这是林分内不同植被类型所带来的结构特征差异影响。为此,大多数研究者从不同类型树种入手,通过对不同树种形

态特征与降雨特征对降雨再分配的影响进行深入研究,试图以此解释林分降雨再分配特征规律。

实际上,即使是同一树种,由于林龄差异,其冠层结构、叶面积指数、基径、枝干数量、枝倾角等也各不相同。尤其是针对许多沙区灌木植被,例如沙柳、柠条、小叶锦鸡儿等,依据中华人民共和国林业行业标准<sup>[25]</sup>,生长到一定年份就需进行平茬复壮。平茬作业既可以保证植被更加健康生长,始终维持着高效的生存生长,又能将平茬后的枝条用于发电、造纸,以维护其经济价值。但大面积开展平茬作业可能导致当年防沙植被缺失,不利于维护生态功能稳定。为此,灌木林建设不会大面积种植同龄林分,而是通过林分内部的抚育时间差异,保证部分林分开展平茬作业同时,其他林分继续维护防沙固土的生态功能。但为保证重复实验的可靠性,当前大多研究主要选择同类同龄树种进行林地降水再分配分析,针对林分内部不同抚育时间下的植被降雨再分配差异研究仍然缺乏,这对于准确估测整体林分降水调配情况以及综合林地水源涵养带来了一定困扰。

对此,试验在内蒙古自治区库布齐沙漠鄂尔多斯造林总场曹四滩护林站展开,以抚育时间为2年、3年和5年沙柳防护林为研究对象,同步监测计算不同抚育时间沙柳林外降水、穿透雨、树干茎流以及冠层截留量等降水分配特征,分析不同抚育时间灌木降雨再分配影响因素,对比沙柳降水分配差异,并通过区域林分分配、抚育时间与平茬期情况对未来5年林地降水再分配进行预测。结果以期通过整体研究与预测对降雨再分配研究中的林龄选择提供理论依据,为综合评价沙区水源涵养及世界其他地区开展林水资源调控与灌木防护林建设提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区库布齐沙漠鄂尔多斯造林总场曹四滩护林站,原国家林业局国有林场和林木种苗工作总站为建设单位,于2011年完成建设任务。地区地理坐标北纬40°14'24",东经110°39'14",位于库布齐沙漠东缘。该地区属温带大陆性季风气候,年平均气温6.1℃,昼热夜冷,全年盛行西风和西北风,平均风速约3.6 m/s,处于半干旱中温带区。沙柳的生长季节主要是5月至9月,土壤以草甸风沙土为主。

由图1所示,研究区灌木林以生态公益林为主,以防风固沙林为种植核心,种植树种以当地特色灌木沙柳为核心,采用均匀配置模式,株距约4m×4m。依托半干旱区灌木平茬复壮技术规范,并结合当地实际情况,选择每年在春季土壤未解冻前进行平茬复壮,平茬间隔期为5年,留茬高度为0—5cm。采用分期隔带平茬方式,依据当地地形及林分分布情况,设置平茬带约8—10m,保留带约16—20m,分2—3次平茬保留带,平茬复壮后采用机械中耕松土,顺行(带)中耕时两侧距灌丛根桩15cm,确保不能损伤灌丛根系与复壮萌条。林区随时对进行人工补植,充分利用林地资源以提高灌木林质量与效益,并时刻加强灌木林病害防治,强化护林防火,全面保护灌木林资源。

### 1.2 样地设置与调查

试验于2023年展开(5—10月)。在充分调查样地条件和林分结构的基础上,选择造林总场内抚育时间为2a、3a、5a沙柳防护林为研究对象,随机划取30m×30m的试验样地,统计样地内2a、3a、5a沙柳灌丛株高、冠幅、林下植被覆盖度等基本信息,并在选取标准灌丛后,进行基径测定,样地调查基本信息详见表1。

表1 调查样地基本情况

Table 1 Basic situation of the survey plot

| 林龄<br>Shrub age/a | 平均株高<br>Average shrub height/m | 平均冠幅<br>Average crown width/m | 平均基径<br>Average Stem diameter/mm | 枝倾角<br>Branch inclination angle/(°) | 叶面积指数<br>Leaf area index/<br>(m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) | 林下植被覆盖度<br>Understory vegetation coverage/% | 林区分布比例<br>Forest area distribution proportion/% |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 2                 | 2.42                           | 2.39                          | 7.61                             | 0—43                                | 2.06                                                           | 67.58                                       | 48.2                                            |
| 3                 | 2.8                            | 3.57                          | 11.05                            | 5—65                                | 2.45                                                           | 41.92                                       | 31.4                                            |
| 5                 | 3.48                           | 4.4                           | 13.15                            | 8—80                                | 2.87                                                           | 62.2                                        | 20.4                                            |



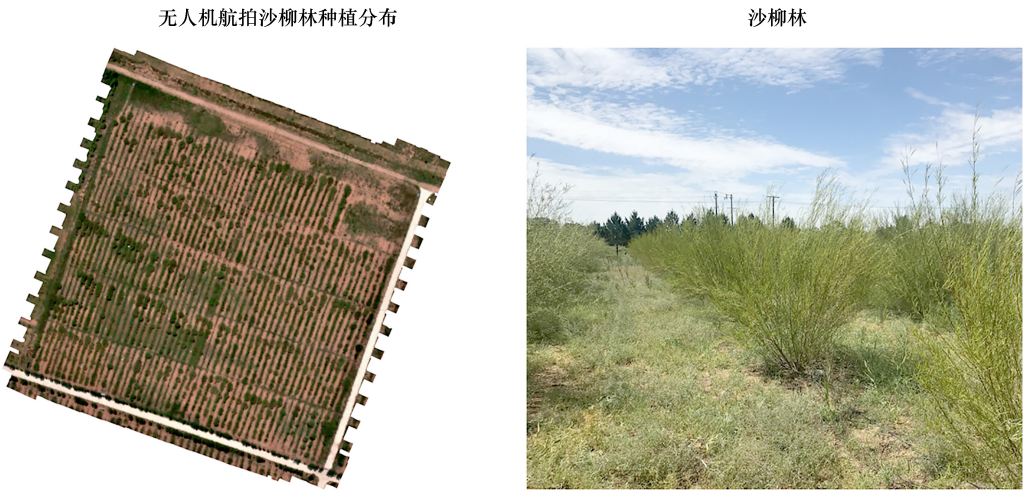


图 1 研究区沙柳灌木林图  
Fig.1 Map of *Salix psammophila* shrubland in the study area

### 1.3 气象因子监测

选取沙柳样地周围无遮挡的开阔位置安装小型 LSI-LASTEM 自动气象站。同步监测林外气象因子,包括气温、风速、风向、太阳辐射、降水量等,每 10min 记录 1 次数据。同时在样地空地处随机放置 3 个直径为 20cm 的雨量桶作为备用和修正。

### 1.4 沙柳林内穿透雨测定及计算

按照 Levia 和 Germer<sup>[26]</sup> 概述方法,在样地中选取 2a、3a、5a 沙柳各 3 丛,如图 2 所示,选用外缘直径为 20cm 的塑料桶承接穿透雨,每丛沙柳下共放置 12 个塑料桶,分别放置 4 行(行间角度为 90°)收集筒,沙柳植株下集水桶与主干距离分别位于灌木根部、冠层中心和冠层边缘,降雨后用量筒测定容器内收集雨量,计算本次降雨的穿透雨量 TF。

$$TF = \frac{1}{m \times FA} \sum_{i=1}^m (VT)_i \times 10$$



图 2 穿透雨与树干茎流设备布置图  
Fig.2 Arrangement of throughfall and stemflow equipment

式中,  $TF$  为穿透雨量 (mm),  $VT$  为第  $i$  个塑料中的穿透雨量桶 (毫升);  $m$  为塑料桶的数量;  $FA$  是塑料桶口面积 ( $\text{cm}^2$ )。

### 1.5 沙柳树干茎流的测定及计算

由于沙柳是多枝干植物, 对此用游标卡尺测量并标记每丛沙柳 (测定穿透雨所选取的沙柳) 的全部基径尺寸。计算平均基径后, 从东、西、南、北、中各选取最接近平均基径的 5 个枝条 (选取枝条的误差不超过 3mm), 安装树干茎流收集器, 用热熔胶及防水胶进行密封, 保证雨水能沿着橡胶管流入收集装置塑料瓶内。每次雨后立即用量筒测量瓶内树干茎流体积 (mL), 借鉴标准枝法<sup>[27]</sup>推算整个灌丛产生的树干茎流体积。树干茎流量计算公式如下:

$$VS = \left( \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 V_s \right) \times N$$

$$SF = VS / (S_p \times 1000)$$

式中,  $VS$  为单株沙柳树干茎流体积 (mL);  $V_s$  为雨后沙柳单枝上测得的茎流 (mL);  $N$  为沙柳枝数;  $SF$  为单株沙柳树干茎流量 (mm);  $S_p$  为沙柳冠层投影面积 ( $\text{m}^2$ )。

### 1.6 沙柳林冠截留计算

依据水量平衡原理, 估算冠层截留损失, 冠层截留量 ( $IL$ ) 的计算公式为:

$$IL = Pg - N = Pg - (TF + SF)$$

式中,  $IL$  为冠层截留损失 (mm);  $Pg$  为林外降雨量 (mm);  $N$  为净降雨量 (mm);  $TF$  为穿透雨量 (mm),  $SF$  为树干茎流量 (mm)。

### 1.7 林地降水再分配综合分析

依据不同抚育时间沙柳的降水再分配情况与林区分布情况, 计算沙柳林地综合降水再分配:

$$C_{TF} = \sum_a ((TF)_a \times (S)_a)$$

$$C_{SF} = \sum_a ((SF)_a \times (S)_a)$$

$$C_{IL} = Pg - C_{TF} - C_{SF}$$

式中,  $C_{TF}$  为沙柳林地综合穿透雨 (mm);  $(TF)_a$  为不同抚育时间的沙柳穿透雨 (mm);  $(S)_a$  为不同抚育时间的林区分布占比 (%);  $C_{TF}$  为沙柳林地综合树干茎流量 (mm);  $(SF)_a$  为不同抚育时间的沙柳树干茎流 (mm);  $C_{IL}$  为沙柳林地综合冠层截留量 (mm)。

依据中华人民共和国林业行业标准中半干旱地区灌木林平茬与复壮技术规范 (LY/T 2676—2016), 结合当地实际情况, 以 5 年为标准平茬期 (即 5a 沙柳在下一年平茬后为 1a), 根据当前林地分布情况, 林龄发展情况及平茬情况, 预估未来 5 年内的降水再分配格局。

### 1.8 数据统计与分析

通过 Excel 和 SPSS 26.0 对进行数据统计处理, 利用 Origin 2017 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究期间林地降雨格局

试验期间 (5 月—10 月) 共监测到 26 次降雨, 总降雨量 210.9mm, 其中单次降雨最大量为 23.1mm, 最小量为 1.4mm。如图 3 所示, 降雨量为 <5mm、5—10mm、10—15mm、15—20mm、20—25mm 的降雨次数分别为 9、8、7、1 和 1 次, 分别占降雨量总次数的 34.61%、30.77%、26.92%、3.85% 和 3.85%, 这表明研究地区降水以小雨 (< 10mm) 事件为主。降水累计降雨量分别为 31.9mm、51.7mm、86.4mm、17.8mm 和 23.1mm, 分别占总降雨量的 15.13%、24.51%、40.97%、8.44% 和 10.95%, 这表明尽管降雨多为小于 10mm 的降水量, 但对当地雨水起主导作用是 10—15mm 降水。降雨强度分布于 0.67—7mm/h 间, 其中 <2mm/h、2—3mm/h、3—4mm/h、4—5mm/h

h 和  $>5\text{mm/h}$  的降雨次数分别为 6、5、6、4 和 5 次,分别占降雨总次数的 23.08%、19.23%、23.08%、15.38% 和 19.23%。累计降雨量分别为 41.9mm、34.5mm、70.3mm、28.9mm 和 35.3mm,分别占总降雨的 19.87%、16.36%、33.33%、13.7% 和 16.74%,这表明当地的降雨强度以 3—4mm/h 为主。林地降雨总时长为 75.8h,单次降雨最短为 0.5h,最长为 8h,其中  $<2\text{h}$ 、2—3h、3—4h、4—5h 和  $>5\text{h}$  的降雨次数分别为 13、4、2、2 和 5 次,分别占降雨总次数的 50%、15.38%、7.69%、7.69% 和 19.23%。累计降雨量分别为 65.5mm、30.4mm、17.6mm、32.1mm 和 65.3mm,分别占总降雨的 31.06%、14.41%、8.35%、15.22% 和 30.96%。

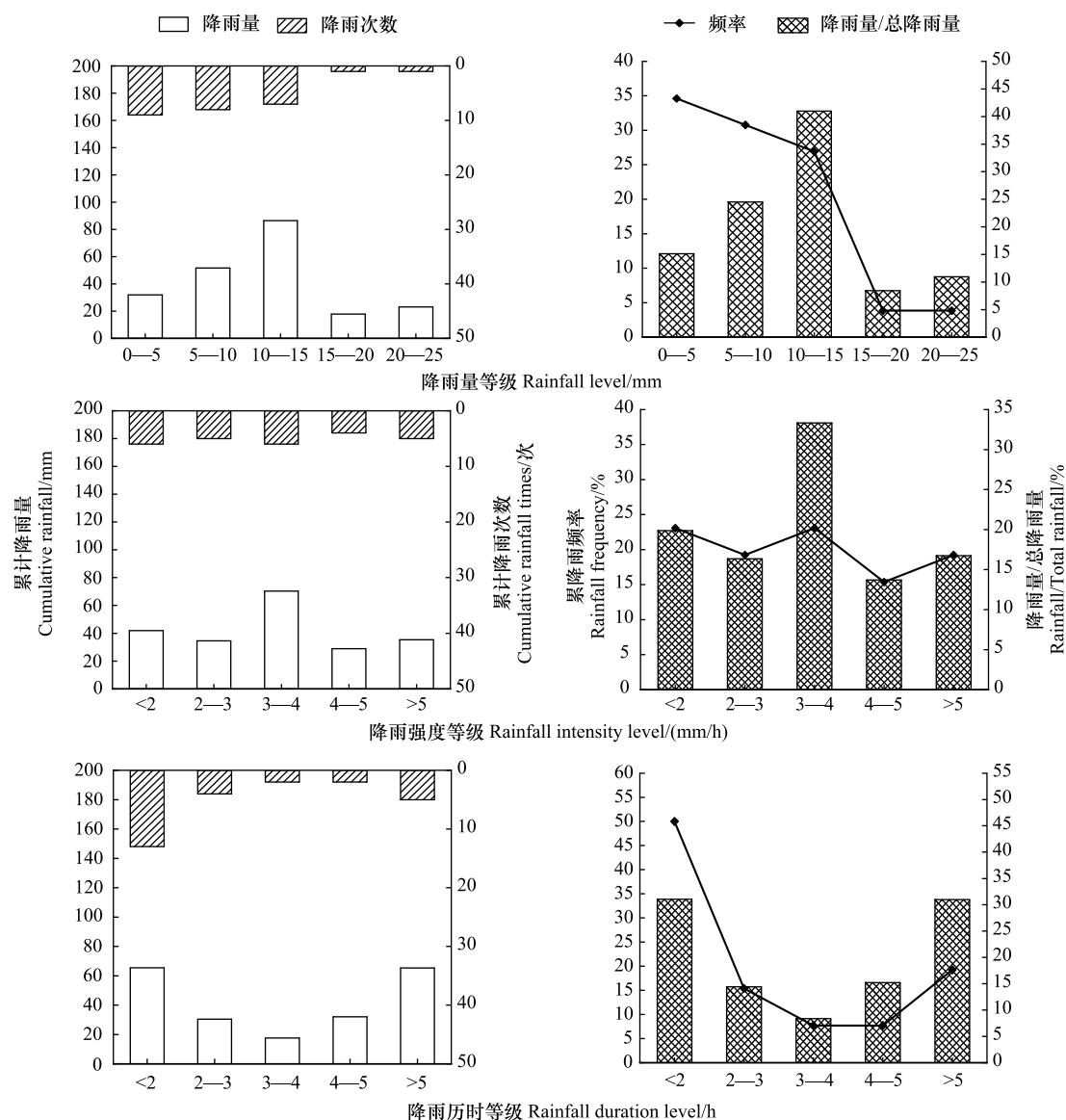


图3 试期间降雨分布特征

Fig.3 Rainfall duration distribution characteristics during the test period

## 2.2 林内穿透雨与林地降雨特征

### 2.2.1 穿透雨与林地降雨量的关系

试验期间,在相同降雨量条件下,不同抚育时间沙柳总穿透雨率介于 50.23%—97.98% 间。总穿透雨量表现为 2a (181.84mm)  $>$  3a (172.77mm)  $>$  5a (162.09mm),各占总降雨量的 86.32%、81.92% 和 76.86%。通过对沙柳灌丛穿透雨和林地降雨量进行回归分析和曲线拟合(图 4),发现不同抚育时间沙柳穿透雨量与降雨量



之间均呈显著线性相关。对穿透雨量与林地降雨量进行回归方程计算,发现 2a 沙柳灌丛产生穿透雨的最小雨量约 0.3mm,3a 约 0.6mm,5a 约 0.8mm,这与实测情况基本相近。不同抚育时间沙柳穿透雨率与降雨量基本呈对数函数关系,这表明在一定程度上,穿透雨率随降雨量的增大而增加,这可能是由于随着降雨量逐渐增大,原本截留在冠层的雨水逐渐产生汇流而从枝叶上滑落,因而表现出穿透雨率逐渐增大的趋势,但随着降雨量增加,枝叶截留雨水逐渐趋近饱和,故而穿透雨率增长速率会逐渐趋于平缓状态。但同时,由于穿透雨率也会受到风速风向等一系列外界条件干扰,故而尽管穿透雨率与降雨量基本呈对数函数关系,但  $R^2$  未达到很高的水平。

通过对沙柳灌丛穿透雨和林地降雨历时进行回归分析和曲线拟合(图 4),发现不同抚育时间沙柳穿透雨量与降雨历时之间均呈线性相关。但与降雨量关系相比,穿透雨受降雨历时影响程度低于受降雨量影响,这表明尽管随着降雨时长增长,沙柳穿透雨量也表现出逐渐增大趋势,但受影响程度低于降雨量带来的影响。其中通过拟合方程可发现,2a 沙柳拟合斜率相对较大,这表明其穿透雨量增长速度相对较快,5a 沙柳穿透雨量增长速度相对较慢。此外,通过对沙柳灌丛穿透雨和林地降雨强度进行分析,发现不同抚育时间的沙柳穿透雨量与林地降雨强度之间均未呈现出显著的相关关系,这表明林地降雨强度与穿透雨可能也受到其他因素干扰,导致两者间影响关系不明显。

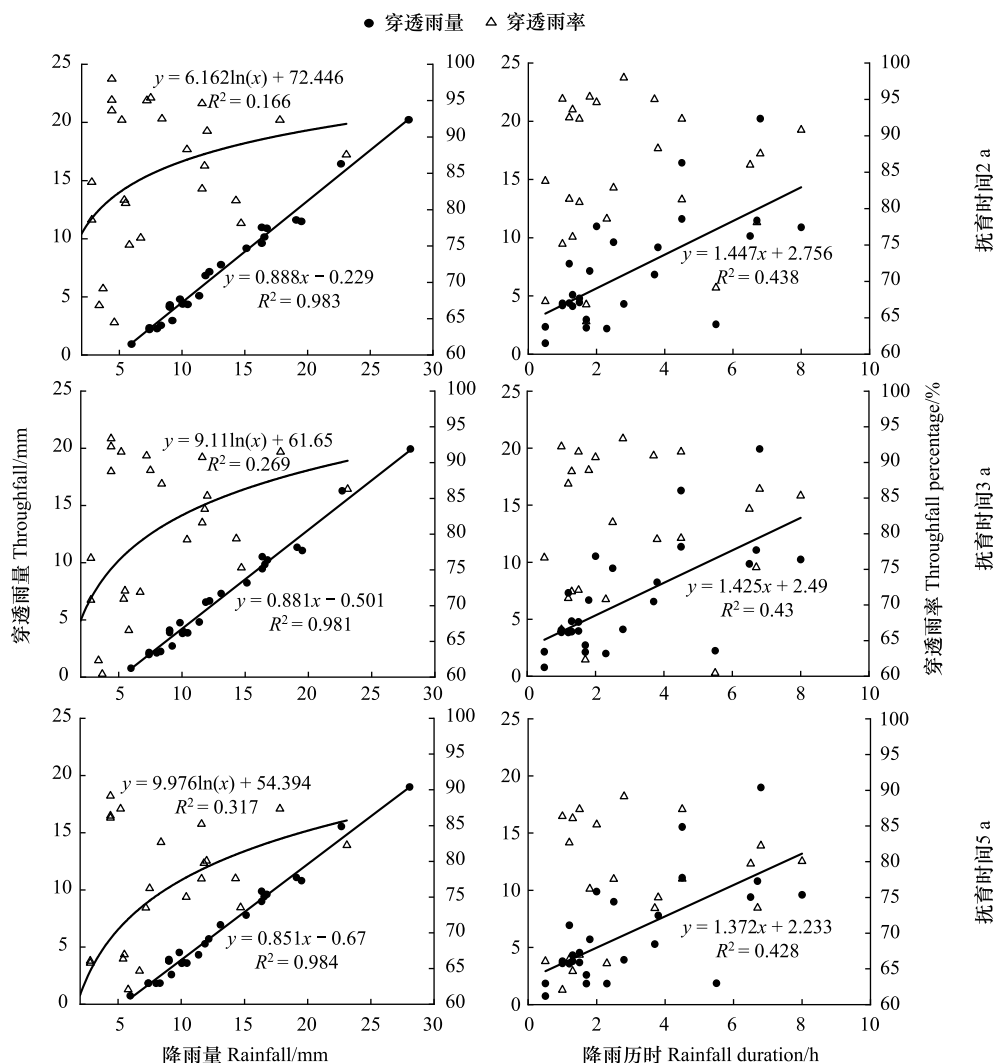


图 4 不同抚育时间沙柳灌丛穿透雨和林地降雨特征之间的关系

Fig.4 Relationship between throughfall and rainfall characteristics in *Salix psammophila* shrubs at different tending time

2.2.2 穿透雨的空间分布特性

通过对不同降雨量下不同抚育时间沙柳穿透雨空间分布进行研究,研究表明穿透雨空间分布具备一定空间异质性。通过实地研究,将穿透雨率低于 38.45%作为“旱极”区域,高于 77.75%作为“雨极”区域,介于 38.45%—77.75%间作为“中间极”区域。由图 5 可见,当雨量为小雨时(降雨量为 4.2mm)沙柳林表现出明显的由冠层内到冠层外穿透雨率逐渐增大,其中 2a 沙柳“雨极”,“中间极”与“旱极”分界均匀,3a 沙柳穿透雨率空间分布较统一,而 5a 沙柳则表现出了较强的拦截能力。当雨量为大雨时(降雨量为 17.2mm),穿透雨率的空间异质性变化没有小雨情况表现明显,2a 沙柳降雨分界不再均匀,而表现出较统一情况。相反 3a 和 5a 沙柳“雨极”与“中间极”的分界相对更明显。这表明,穿透雨空间分布特征受到植被抚育时间与降雨特征双重影响,应综合考虑林地整体情况以准确判断穿透雨空间分布。

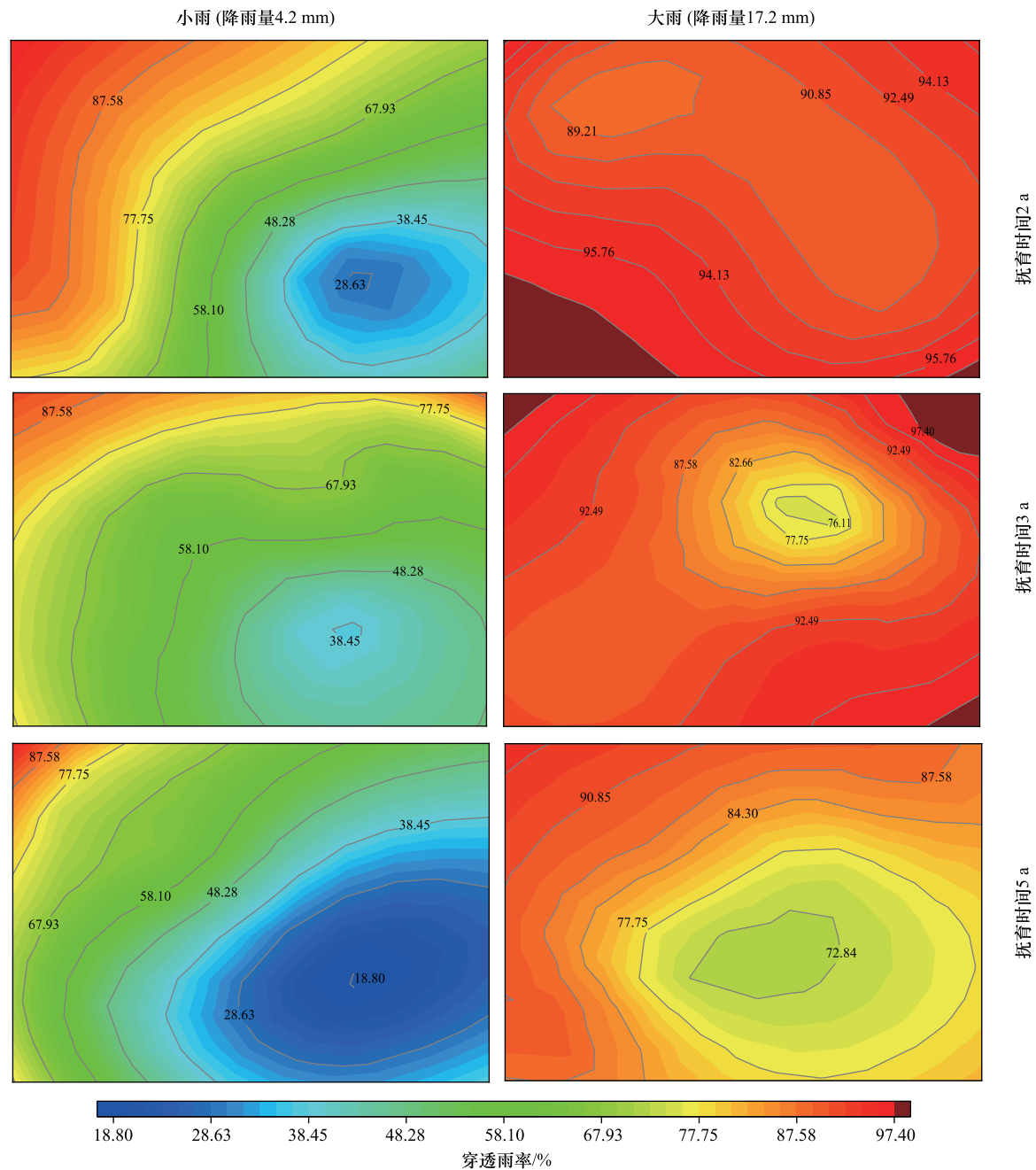


图 5 不同抚育时间沙柳灌丛穿透雨空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution characteristics of throughfall in *Salix psammophila* shrubs at different tending time



### 2.3 树干茎流与林地降雨特征

试验期间,研究区共观测到抚育时间为 2a 沙柳树干茎流总量 3.08mm,占总降雨量的 1.46%,树干茎流率介于 0%—2.16%间;3a 沙柳树干茎流总量 7.73mm,占总降雨量 3.66%,树干茎流率介于 0%—4.67%间;5a 沙柳树干茎流总量 8.76mm,占总降雨量的 4.15%,树干茎流率介于 0%—5.98%间。通过对沙柳灌丛树干茎流和林地降雨量进行回归分析和曲线拟合(图 6),发现不同抚育时间沙柳树干茎流量与降雨量之间均呈显著线性相关。通过对树干茎流量与林地降雨量进行回归方程计算,发现 2a 沙柳灌丛产生树干茎流最小雨量约 2.05mm, 3a 约 1.27mm, 5a 约 1.49mm,可能受到风向等自然条件干扰,计算值略小于实测情况值,但都表现为  $2a > 5a > 3a$ 。不同抚育时间沙柳树干茎流率与降雨量基本呈对数函数关系,这表明在一定程度上,树干茎流率随降雨量增大而增加。这可能是由于随着降雨量增大,树干茎流产生汇流现象,因而表现出逐渐增大趋势,而随着降雨量增加,树干茎流率增长速率会逐渐减缓。相同降雨量条件下,不同抚育时间沙柳树干茎流率表现为  $5a > 3a > 2a$ ,这可能由于 5a 沙柳灌丛枝干数量与枝叶茂盛程度均高于 2a 和 3a 沙柳灌丛,因而产生的茎流率也较高。

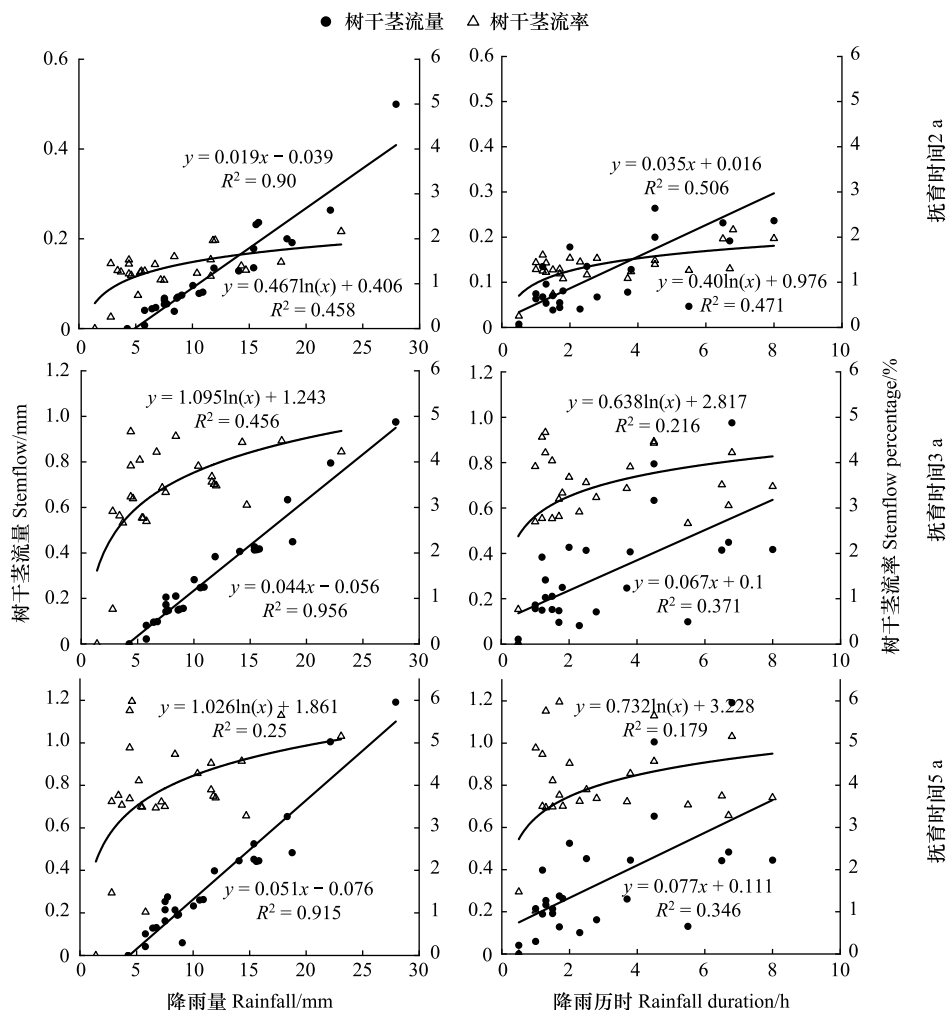


图 6 不同抚育时间沙柳灌丛树干茎流和林地降雨特征之间的关系

Fig.6 Relationship between stemflow and rainfall characteristics in *Salix psammophila* shrubs at different tending time

对沙柳灌丛树干茎流和林地降雨历时进行回归分析和曲线拟合,发现不同抚育时间的沙柳树干茎流量与降雨量之间均呈线性相关。这表明随着降雨时长的逐渐增长,沙柳树干茎流量也表现出逐渐增大趋势。其中通过拟合方程可发现, 5a 沙柳拟合斜率相对较大,这表明其树干茎流量增长速度相对较快,而 2a 沙柳树干茎

流量增长速度相对较慢。不同抚育时间沙柳树干茎流率与降雨历时基本呈对数函数关系,这表明在一定程度上,树干茎流率随降雨历时的增长而增加,这可能是由于随着降雨历时的增长,枝干上雨水逐渐产生汇流,因而树干茎流率逐渐增大,而随着降雨时长的增加,树干茎流率增长速率会逐渐减缓。通过对沙柳灌丛穿透雨和林地降雨强度进行分析,发现不同抚育时间的沙柳树干茎流量与林地降雨强度之间均未呈现出显著的相关关系,这可能由于树干茎流量受到降雨量、降雨时长、风向风速、灌木结构等多方面影响,而受到林地降雨强度影响较弱,因而未呈现出明显的相关关系。

#### 2.4 冠层截留损失与林地降雨特征

试验期间,研究区共观测到 2a 沙柳冠层截留总量为 25.98mm, 占总降雨量的 12.32%, 冠层截留损失率介于 0.49%—34.32% 间; 3a 沙柳冠层截留总量为 30.40mm, 占总降雨量的 14.42%, 冠层截留损失率介于 3.39%—44.64% 间; 5a 沙柳冠层截留总量为 40.05mm, 占总降雨量的 18.99%, 冠层截留损失率介于 7.01%—46.43% 间。通过对沙柳灌丛冠层截留和林地降雨量进行回归分析和曲线拟合(图 7), 发现不同抚育时间的沙柳冠层截留量与降雨量之间均呈线性相关, 这表明不同抚育时间的沙柳冠层截留量均随降雨量的增大而增加。在相同降雨量下, 冠层截留量表现为 5a>3a>2a, 冠层截留损失率与降雨量基本呈对数函数关系, 这表明冠层

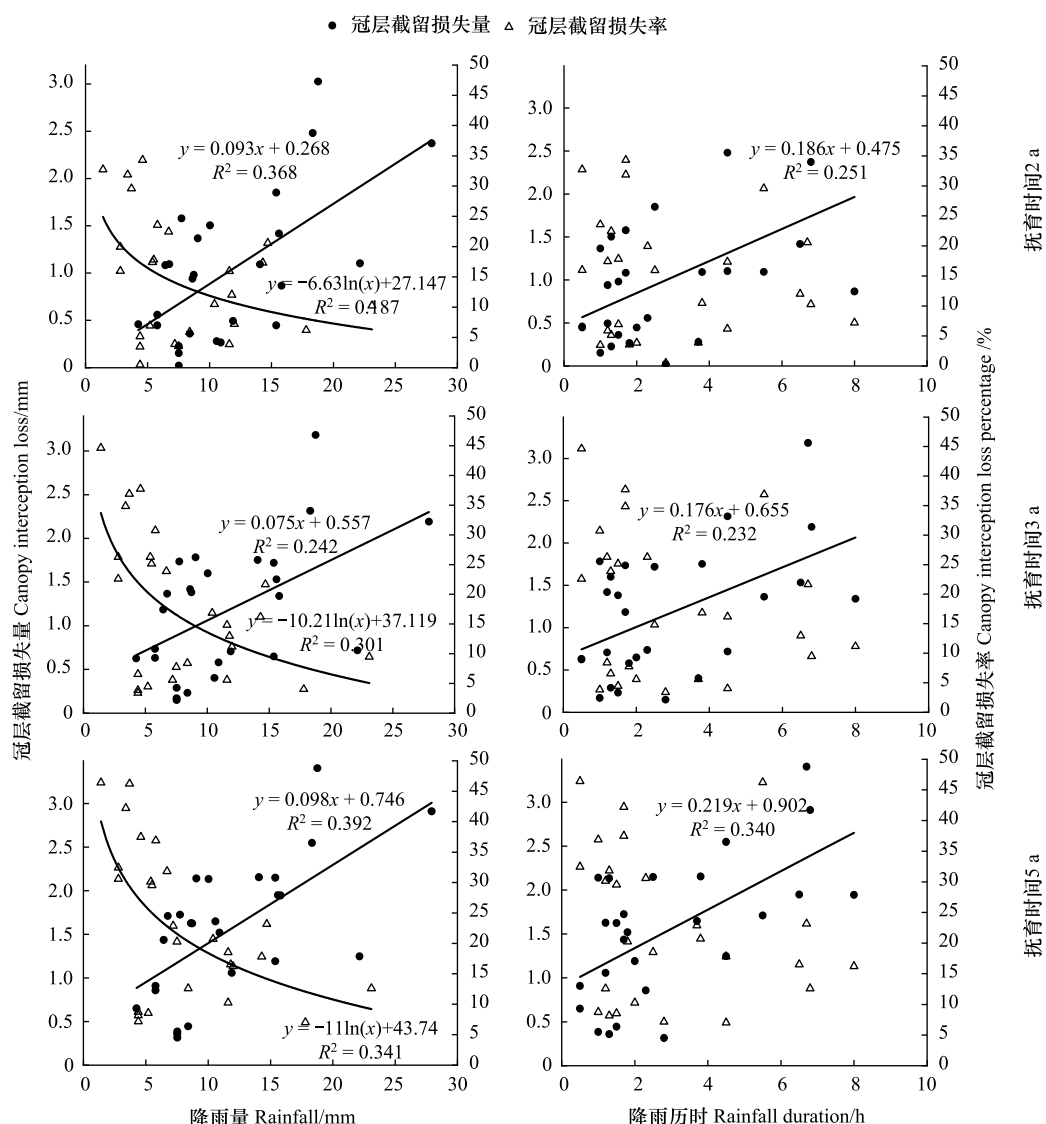


图 7 不同抚育时间沙柳灌丛树干截留和林地降雨特征之间的关系

Fig.7 The relationship between canopy interception and rainfall characteristics in *Salix psammophila* shrubs at different tending time

截留损失率随降雨量的增加而逐渐减少,并逐渐趋于稳定,即冠层拦截雨水程度随雨水积累而逐渐减缓,直至平衡。

对沙柳灌丛冠层截留和林地降雨历时进行回归分析和曲线拟合,发现不同抚育时间沙柳冠层截留量与降雨量之间均呈线性相关,这表明随着降雨时长的逐渐增长,沙柳冠层截留量也逐渐增大,以 5a 沙柳随降雨增长的拦截速度最快。冠层截留损失率与降雨历时之间未表现出明显的相关关系,这表明降雨历时并非其核心影响条件。

通过对沙柳灌丛冠层截留和林地降雨强度进行分析。研究表明,不同抚育时间的沙柳冠层截留量、冠层截留损失率与林地降雨强度之间均未呈现出明显的相关关系,这可能由于在随着林地降雨强度增加,灌木结构逐渐出现变形或受损(图 8),使得冠层截留受到不可控影响,因而未呈现出明显相关关系。



图 8 沙柳灌丛降雨前后冠层结构对比图

Fig.8 Comparison of canopy structure of *Salix psammophila* shrubs before and after rainfall

## 2.5 当地整体林地综合评估与预测

由表 2 可知,不同抚育时间沙柳的降雨再分配情况具有一定差异。通过对林区分布比例与不同抚育时间沙柳降雨再分配数据综合计算,确定林地总穿透雨量为 174.95mm,总树干茎流量为 5.70mm,冠层截留量为 30.25mm,各占林外降雨 82.96%,2.70%和 14.34%。此外,通过对比得知,当地降水再分配综合评估值与 3a 沙柳林最为相近,这表明当年可以通过 3a 龄沙柳进行整体林水预测评估。

表 2 林地降水再分配综合评估

Table 2 Comprehensive assessment of forestland precipitation redistribution

| 降雨再分配特征<br>Rainfall redistribution<br>characteristics/mm | 2a     | 3a     | 5a     | 林地降水综合评估<br>Comprehensive assessment<br>of forestland precipitation/mm | 占总降雨比例<br>Proportion of<br>total rainfall/% |
|----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 穿透雨量 Throughfall                                         | 181.84 | 172.77 | 162.09 | 174.96                                                                 | 82.96                                       |
| 树干茎流量 Trunk stemflow                                     | 3.08   | 7.73   | 8.76   | 5.70                                                                   | 2.70                                        |
| 冠层截留量 Canopy interception                                | 25.98  | 30.4   | 40.05  | 30.24                                                                  | 14.34                                       |

以本研究中沙柳生长期(5月—10月)的降雨量(210.9mm)为基准。刚平茬后林龄为 1a 的沙柳穿透雨量记为林外降雨量,林龄为 4a 的沙柳降雨再分配情况取 3a 与 5a 降雨再分配情况均值,综合林地林分分配与林龄降水再分配情况,预测未来的降雨再分配结果如图 9 所示。

由图 9 可见,在综合考虑平茬期与沙柳生长与林地分布情况下,沙柳综合穿透雨率介于 79.99%—91.47%间,树干茎流率介于 1.26%—3.48%间,冠层截留率介于 7.28%—16.53%间。沙柳的穿透雨未来呈现出先降低后升高的变化趋势,冠层截留呈现出先升高后降低的变化趋势。此外,在进行林水资源研究时,对每年进行林



分综合计算后,其降雨再分配格局主要贴近3种不同抚育时间沙柳的中林龄林分。故而若不方便进行林龄差异处理时,在林分林龄分布差异不突出的前提下,应尽量选择中龄林分进行相关研究,以便减少抚育时间差异干扰。

### 3 讨论

#### 3.1 不同抚育时间沙柳降水再分配特征

森林冠层对降雨量的重新分配是一个动态而复杂的过程。研究期间,不同抚育时间下沙柳的穿透雨表现出 $2a > 3a > 5a$ 的变化趋势,这表明沙柳对穿透雨截留能力随抚育时间的增长而增强。低林龄沙柳到达地面的穿透雨量更多,更有利于保持土壤湿度和补给地下水,在促进水文循环与快速生物质增长方面效益更突出;而高林龄沙柳到达地面的穿透雨量相对较低,更有

利于减少径流产生与降低土壤侵蚀,在防风固土、保持水土和生物多样性保护方面发挥更大的作用。对此,应通过合理运用灌木平茬期,以进一步平衡林分林龄结构,进而优化生态系统服务功能。树干茎流则表现出 $5a > 3a > 2a$ 的变化趋势,这表明沙柳的树干茎流量随抚育时间增长而增加。抚育时间较长的沙柳可通过枝干汇流,将更充足的水分富集于根系,更利于植被水分传输,在调节局部和区域水文循环方面起着更重要作用。此外,植被降水再分配调控可能受到的冠层对降雨雨滴能量的影响。已有研究表明,不同抚育时间内各雨滴径基的雨滴谱规律存在极显著差异,以抚育时间较短的林分对雨水的分散作用更明显<sup>[28]</sup>,为此受到分散作用影响,林龄较小的沙柳表现出穿透雨量更大的现象,而抚育时间较长的树种对雨水的汇集作用更突出<sup>[28]</sup>。对此林龄较大的沙柳则表现出树干茎流更强的趋势。

研究发现2a沙柳灌丛产生穿透雨的最小雨量约0.3mm,3a约0.6mm,5a约0.8mm,表现出随着抚育时间增大,产生穿透雨的最小雨量对应增加的趋势。2a产生树干茎流的最小雨量约2.05mm,3a约1.27mm,5a约1.49mm,表现为 $2a > 5a > 3a$ ,其中2a沙柳灌丛产生树干茎流的阈值较高。这可能由于2a生沙柳枝干较细弱,不易汇集成茎流量,而5a沙柳抚育时间较长,其郁闭度及叶面积指数也较高,茂密的枝叶影响了降雨截留作用,故而两者产生的树干茎流的阈值均高于3a沙柳。即在降雨量较小的情况下,不同抚育时间的沙柳对降雨反应具有一定差异。此外,整体上看,树干茎流产生阈值均高于穿透雨,这与赵文玥等<sup>[29]</sup>研究结论相同。

降雨特征是影响降雨再分配的关键因素。研究发现,不同抚育时间沙柳对降雨特征表现出相同的变化趋势。通过回归分析和曲线拟合,不同抚育时间沙柳降雨量与穿透雨量、树干茎流量和冠层截留均呈正相关,这与大多研究结论一致<sup>[30-32]</sup>。但拟合曲线的斜率存在差异,这表明降雨量对不同抚育时间沙柳降雨再分配的影响速度不同。降雨特征影响中,林外降雨量与林外降雨历时是对降雨分配影响的关键因素,而降雨强度的影响并不明显,这与赵文玥<sup>[29]</sup>等研究结果相似,与汪水前等<sup>[33]</sup>研究结果不同,这表明降雨强度可能在一定程度上对降水再分配具有一定影响,但由于受到不同气象因子(风向等)及植被类型干扰,不同植被在不同降雨强度下冠层结构受到影响情况不同,因此降雨强度影响情况不定。

#### 3.2 不同抚育时间的沙柳降水空间分布情况

通过降雨量对不同抚育时间沙柳的穿透雨空间分布进行研究,发现穿透雨空间分布具备一定空间异质性,这与大多研究者<sup>[34-35]</sup>结论相同。而当雨量为小雨时,穿透雨率的空间异质性表现明显,整体表现出由冠层内到冠层外逐渐增大,其中林龄较小的沙柳“雨极”,“中间极”与“旱极”分界均匀,这可能由于抚育时间短的林分处于成长期,冠层结构并不均匀,因而对穿透雨空间分布具有明显差异。而林龄中间沙柳由于冠层

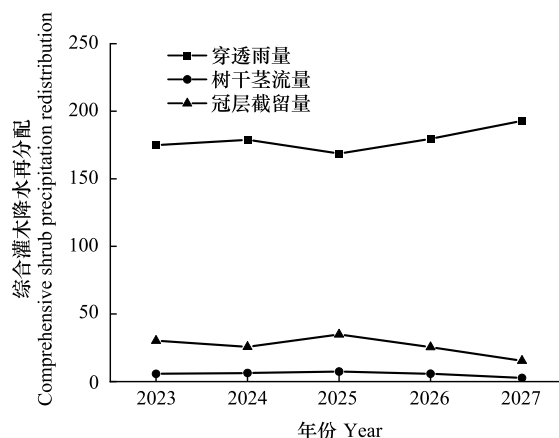


图9 未来5年沙柳灌丛降雨再分配预测

Fig.9 Prediction of rainfall redistribution in *Salix psammophila* shrubland in the next five years



结构相对完整,对穿透雨的空间分布较均匀统一,林龄较大的沙柳则由于冠层茂盛,在小雨中则突出表现出拦截作用。当雨量为大雨时,此时冠层由于雨水饱和,穿透雨率的空间异质性变化不再明显。此时林龄较小的林分降雨分界不再均匀,枝干较弱直接导致结构略有变形,对此穿透雨空间分布表现出较为统一的淹没情况。相反抚育时间为 3a 和 5a 的沙柳由于枝干相对坚挺,“两极”与“中间极”的分界表现的更为明显。研究表明,穿透雨的空间分布特征会受到植被抚育时间与降雨特征双重影响,对此应综合考虑林地整体情况以准确判断穿透雨空间分布特性。

### 3.3 林地降雨再分配综合评估与预测

通过当地的不同抚育时间沙柳的林分分布与降水再分配特征进行综合计算,确定林地总穿透雨量为 174.95mm,总树干茎流量为 5.70mm,冠层截留量为 30.25mm,分别占总降雨量 82.96%、2.7%、14.34%,与毛乌素沙地 5a 的沙柳(72.2%、2.9%、24.9%)<sup>[36]</sup>在穿透雨与冠层截留上具有较大差异,通过对比得知,综合评估值与 3a 的沙柳最相近。3a 与 5a 沙柳穿透雨与冠层截留上区别较大,而在树干茎流量上差异并不突出,这表明抚育时间对降雨再分配的影响主要体现在穿透雨方面,对树干茎流量影响并不明显。本研究与科尔沁沙地的黄柳(82.78%、2.9%、15.03%)<sup>[37]</sup>、元江干热河谷稀树灌丛(83.8%、1.9%、14.3%)<sup>[38]</sup>、墨西哥硬叶有刺灌丛(Matorral community)(83.30%、8.50%、8.20%)<sup>[39]</sup>的降雨再分配情况相近,但与乔木的降雨再分配情况差异较大<sup>[40-41]</sup>,对比发现灌木林穿透雨率更大,而乔木林在树干茎流与冠层截留率上更大。

根据当前林地分布情况,林龄发展情况及平茬情况,对未来 5 年内的降水再分配格局进行预测。随着沙柳年龄变化,整体林分降水再分配格局随着发生变化,整体沙柳综合穿透雨率介于 79.99%—91.47%间,树干茎流率介于 1.26%—3.48%间,冠层截留率介于 7.28%—16.53%间。通过研究可知,在降雨量相对稳定的前提下,穿透雨量在五年内表现出先略降低后增长的变化趋势。穿透雨量的增加有利于稳定土壤湿度,但相对不利于土壤侵蚀及防沙固土功能,对此根据预测变化情况,建议于 2025 年在沙柳丛内混植小型林下植被,例如部分蕨类植物,确保在 2026、2027 年等预估穿透雨量较大年份,保证防沙固土与植被生长双重效益。研究预测每一年降水再分配变化时,对该年进行林分综合计算后,发现每年的降雨再分配格局主要贴近 3 种不同抚育时间沙柳的中间林龄沙柳。这表明在进行林水资源相关研究时,在林分林龄分布差异不特别突出的前提下,若不方便进行林龄差异处理,应尽量选择中龄林分进行相关研究,以减少抚育时间差异对研究的影响。

## 4 结论

植被降水再分配对区域水文循环和林水稳定具有重要影响,研究通过对 2a、3a 和 5a 的沙柳林进行降水分配特征分析,结果表明不同抚育时间林分的降雨分配特征具有一定差异。通过对未来 5 年内的降水再分配格局进行预测,根据预测变化情况,建议于 2025 年在沙柳丛内混植小型林下植被,例如部分蕨类植物,确保在 2026、2027 年等预估穿透雨量较大年份,保证防沙固土与植被生长双重效益。此外,建议在未来进行林水资源研究时,若不方便进行林龄差异处理,可选择中龄林分进行相关研究,以减少抚育时间差异对研究的影响。

### 参考文献(References):

- [1] Magliano P N, Whitworth-Hulse J I, Florio E L, Aguirre E C, Blanco L J. Interception loss, throughfall and stemflow by *Larrea divaricata*: the role of rainfall characteristics and plant morphological attributes. *Ecological Research*, 2019, 34(6): 753-764.
- [2] 张瑞. 黄土塬区农田和果园降雨再分配及蒸散耗水特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [3] 艾长江. 黄土高原典型灌丛穿透雨特征与影响机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [4] Dunkerley D. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Processes*, 2000, 14(4): 669-678.
- [5] Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(1/2): 37-54.
- [6] 蔡体久, 朱道光, 盛后财. 原始红松林和次生白桦林降雨截留分配效应研究. *中国水土保持科学*, 2006, 4(6): 61-65.
- [7] Shachnovich Y, Berliner P R, Bar P. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(1/2): 168-177.

- [ 8 ] Van Stan J T, Gordon D A. Mini-review: stemflow as a resource limitation to near-stem soils. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 248.
- [ 9 ] Li X Y, Liu L Y, Gao S Y, Ma Y J, Yang Z P. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semiarid loess region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1501-1507.
- [ 10 ] Loescher H W, Powers J S, Oberbauer S F. Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, *Costa Rica*. *Journal of Tropical Ecology*, 2002, 18(3): 397-407.
- [ 11 ] Germer S, Werther L, Elsenbeer H. Have we underestimated stemflow? Lessons from an open tropical rainforest. *Journal of Hydrology*, 2010, 395(3/4): 169-179.
- [ 12 ] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 2000, 14(1617): 2903-2920.
- [ 13 ] Cuartas L A, Tomasella J, Nobre A D, Hodnett M G, Waterloo M J, Múnera J C. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central *Amazonia*: marked differences between normal and dry years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145(1/2): 69-83.
- [ 14 ] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 1971, 9: 367-384.
- [ 15 ] Gash J H C, Wright I R, Lloyd C R. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 1980, 48(1/2): 89-105.
- [ 16 ] Chang M. *Forest hydrology: an introduction to water and forests*. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [ 17 ] Siegert C M, Levia D F, Hudson S A, Dowtin A L, Zhang F, Mitchell M J. Small-scale topographic variability influences tree species distribution and canopy throughfall partitioning in a temperate deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 2016, 359: 109-117.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 雷丽群, 郑路, 农友, 刘士玲, 李华, 黄德卫. 降雨特征对红锥人工林降水分配格局的影响. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 460-468.
- [ 20 ] 巩合德, 王开运, 杨万勤, 王乾, 张远彬. 川西亚高山白桦林穿透雨和茎流特征观测研究. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 17-20.
- [ 21 ] 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*. *Journal of Hydrology*, 2000, 237(1/2): 40-57.
- [ 22 ] Jackson I J. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *Journal of Hydrology*, 1975, 24(3/4): 215-238.
- [ 23 ] 赵海蓉, 帅伟, 李静, 吴福忠, 杨万勤, 谭波. 华西雨屏区几种典型人工林降雨截留分配特征. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 94-100.
- [ 24 ] 刘旻霞. 青海云杉林林冠截留与大气降水的关系. *甘肃农业大学学报*, 2004, 39(3): 341-344.
- [ 25 ] 国家林业局. 半干旱地区灌木林平茬与复壮技术规范: LY/T 2676—2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [ 26 ] Levia D F, Germer S. A review of stemflow generation dynamics and stemflow-environment interactions in forests and shrublands. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 673-714.
- [ 27 ] Lindroth A, Cermak J, Kucera J, Cienciala E, Eckersten H. Sap flow by the heat balance method applied to small size *Salix* trees in a short-rotation forest. *Biomass and Bioenergy*, 1995, 8(1): 7-15.
- [ 28 ] 涂晓云, 王克勤, 赵洋毅等. 滇中高原不同抚育时间华山松林冠层对天然降雨雨滴能量特征的影响. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 40-49.
- [ 29 ] 赵文玥, 吉喜斌, 金博文, 焦丹丹, 张靖琳, 郭飞, 赵丽雯. 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. *生态学报*, 2022, 42(2): 804-817.
- [ 30 ] 邓雅丽, 赵新宇, 崔自杰, 冯英杰, 张卫强, 刘效东. 中国森林生态系统林冠层降雨截留特征. *生态学报*, 2024, 44(7): 2981-2992.
- [ 31 ] 蔡进军. 宁夏黄土丘陵区人工林草植被生态水文过程与功能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [ 32 ] 朱占军, 李玉雯, 王子怡, 王雨晴, 高云昌, 马增旺, 刘海翔, 李玉灵, 李晓刚. 冀北坝上地区榆树和樟子松人工林降雨再分配特征研究. *林业与生态科学*, 2023, 38(2): 136-144.
- [ 33 ] 汪水前. 南方水土流失区马尾松对降雨再分配的影响. *中国水土保持科学: 中英文*, 2022, 20(2): 99-105.
- [ 34 ] 李紫晴, 王金满, 时文婷, 王悦, 徐启胜, 王敬朋. 排土场典型树种穿透雨空间分布特征. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 271-279.
- [ 35 ] 杨新国, 古君龙, 王兴, 陈林, 王磊, 宋乃平, 曲文杰. 荒漠草原中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)冠层穿透雨的发生与分布特征. *干旱区研究*, 2019, 36(1): 131-138.
- [ 36 ] 杨志鹏, 李小雁, 孙永亮, 刘连友, 张晓影, 马育军. 毛乌素沙地沙柳灌丛降雨截留与树干茎流特征. *水科学进展*, 2008, 19(5): 693-698.
- [ 37 ] 岳祥飞, 崔建垣, 张铜会, 王少昆, 连杰, 王新源, 云建英. 科尔沁沙地黄柳灌丛降雨截留与再分配特征. *草业学报*, 2013, 22(6): 46-52.
- [ 38 ] 熊壮, 叶文, 张树斌, 杨大新. 元江稀树灌丛降雨再分配及其与气象因子的关系. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 47-53.
- [ 39 ] Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58(2): 181-202.
- [ 40 ] 刘兰, 刘怡, 孙佳瑞, 宗桦. 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. *中国城市林业*, 2022, 20(3): 29-35, 68.
- [ 41 ] 郭波, 阳辉, 李佳聪, 朱春雨, 赵宇寒, 曹建生, 沈彦俊. 太行山典型油松林降雨再分配规律. *中国生态农业学报: 中英文*, 2023, 31(12): 2011-2021.