

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2024.05.019

宫联沙, 杨静, 戴全厚, 等. 不同降雨类型下植被剔除对灌木林降雨再分配特征的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 315-322.

GONG Liansha, YANG Jing, DAI Quanhong, et al. Effects of vegetation exclusion on rainfall redistribution characteristics of shrubs under different rainfall types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 315-322.

## 不同降雨类型下植被剔除对灌木林降雨再分配特征的影响

宫联沙<sup>1,2</sup>, 杨静<sup>1,2</sup>, 戴全厚<sup>1</sup>, 聂云鹏<sup>2,3</sup>, 周畅<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学林学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100; 3. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

**摘要:** [目的] 为探究不同季节及降雨类型下, 林分冠层结构发生改变对降雨分配特征的影响。[方法] 以喀斯特区典型灌木林为研究对象, 选取 3 个 10 m×10 m 的样地, 分别进行 30% (TC<sub>30</sub>) 和 10% (TC<sub>10</sub>) 的植被剔除, 并以不剔除 (TC<sub>0</sub>) 作为对照, 分别于旱雨季对剔除处理后各样地的穿透雨、树干径流等进行监测。[结果] 旱雨季不同降雨类型下, 各样地穿透雨率为 72.3%~96.6%, 不同剔除比例下样地间穿透雨率总体上无明显差异。无论在旱季或雨季, 树干径流率在各降雨类型下均表现为 TC<sub>0</sub> (5.6%~13.9%) > TC<sub>10</sub> (4.8%~8.1%) > TC<sub>30</sub> (2.1%~6.1%), 其中旱季中雨、雨季大雨和雨季暴雨下差异显著 ( $p < 0.05$ )。相较 TC<sub>0</sub> 和 TC<sub>10</sub>, TC<sub>30</sub> 样地的降雨输入量 (穿透雨+树干径流) 在旱季或雨季均为最高 (分别为 98.9% 和 94.8%)。[结论] 综上所述, 剔除植被对穿透雨率影响不明显, 但可显著降低树干径流率, 且适当疏林可提高降雨输入量, 增加土壤和植被可用水量, 提高降雨-土壤水转化效率, 研究结果可为喀斯特区提高降水资源利用效率提供参考。

**关键词:** 穿透雨; 树干径流; 旱雨季; 降雨类型; 喀斯特区

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0315-08

## Effects of Vegetation Exclusion on Rainfall Redistribution Characteristics of Shrubs Under Different Rainfall Types

GONG Liansha<sup>1,2</sup>, YANG Jing<sup>1,2</sup>, DAI Quanhong<sup>1</sup>, NIE Yunpeng<sup>2,3</sup>, ZHOU Chang<sup>1,2</sup>

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China; 3. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

**Abstract:** [Objective] In order to explore the effects of canopy structure changes on rainfall distribution characteristics under different seasons and rainfall types. [Methods] Taking karst typical shrub forest as the research object, three 10 m×10 m plots were selected to remove 30% (TC<sub>30</sub>) and 10% (TC<sub>10</sub>) vegetation, respectively, and no exclusion (TC<sub>0</sub>) was used as the control to monitor the throughfall and stemflow of each sample plot after removal in the dry and rainy seasons. [Results] The throughfall rate of each sample plot was 72.3%~96.6% under different rainfall types in the dry and rainy season, and there was no significant difference in the throughfall rate of each sample plot under different rainfall types or exclusion ratios. However, the stemflow rate was TC<sub>0</sub> (5.6%~13.9%) > TC<sub>10</sub> (4.8%~8.1%) > TC<sub>30</sub> (2.1%~6.1%) in both dry and rainy seasons, and there were significant differences under moderate rainfall in dry season, heavy rain in rainy season and heavy rain in rainy season ( $p < 0.05$ ). In addition, compared with TC<sub>0</sub> and TC<sub>10</sub>, TC<sub>30</sub> had the highest rainfall input (throughfall + stemflow) in both the dry and rainy seasons (98.9% and 94.8%, respectively). [Conclusion] The removal of vegetation has no obvious effect on the throughfall rate, but can significantly reduce the stemflow rate, and appropriate forest thinning can increase rainfall input, increase

收稿日期: 2024-04-10

修回日期: 2024-05-19

录用日期: 2024-06-14

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-08-28

资助项目: 贵州省科学技术基金项目 (黔科合基础-ZK[2021]一般 223); 国家自然科学基金项目 (42161009, 31971438)

第一作者: 宫联沙 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: 873607717@qq.com

通信作者: 杨静 (1987—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生态水文研究。E-mail: kinty920@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

soil and vegetation water availability, and improve the rainfall-soil water conversion efficiency, which can provide a reference for improving the rainfall resource use efficiency in karst areas.

**Keywords:** throughfall; stemflow; dry and rainy season; type of rainfall; karst

Received: 2024-04-10

Revised: 2024-05-19

Accepted: 2024-06-14

Online(www.cnki.net): 2024-08-28

由于地形地貌类型丰富和地质条件的特殊性,喀斯特区生态脆弱,水文过程独特,与非喀斯特区有显著差异<sup>[1]</sup>。在西南喀斯特区,气候类型为亚热带季风气候,虽降雨充足,但因为土层浅薄不连续、土壤保水性差和地下岩石的高渗透性等原因,以及降雨的时空分布不均匀<sup>[2-3]</sup>,植物常常经受干旱胁迫作用,水分亏缺成为该区植被生长的重要限制性因子<sup>[4]</sup>。降雨是该区植被和土壤水分的主要来源,而降雨的输入过程受到多种因素的综合影响<sup>[5]</sup>,亟待弄清降雨的再分配特征及植被对其的影响。

降雨是喀斯特区植物生长的关键驱动因素之一<sup>[6]</sup>,森林植被对降雨的再分配作用是影响降雨输入的重要部分<sup>[7]</sup>。降雨经过植被冠层的再分配作用,转化为穿透雨和树干径流输入土壤,改变降雨在林下的水平分布格局及影响土壤表面的雨水补给作用<sup>[8-11]</sup>。作为土壤-植物-大气连续体中生态水文过程的重要环节,冠层降雨的再分配在养分循环与植被恢复方面发挥着重要作用<sup>[12-13]</sup>。降雨特征(降雨量、降雨强度和降雨历时)是影响冠层降雨再分配模式的主要因素。对科尔沁小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛的穿透雨特征研究<sup>[14]</sup>结果表明,穿透雨量与总降雨量存在线性正相关,而随着降雨量和降雨强度的增加,穿透雨量在总降雨中的比例逐渐增加,二者之间呈对数函数关系;孙忠林等<sup>[15]</sup>和 ZHANG 等<sup>[16]</sup>研究降水再分配特征表明,在降雨再分配作用中降雨量是重要影响因子;王甜甜<sup>[17]</sup>研究表明,沙柳灌丛的冠层截留量、穿透雨量及树干径流量与降雨量之间均呈线性正相关;荐圣淇等<sup>[18]</sup>研究也得到类似结论,表明不同降雨量下各降雨组分占比不同。

降雨分配特征还受植被特征的影响,不同类型植被对降雨的再分配作用存在显著差异<sup>[19]</sup>,其中,植被本身的形态特征对林冠降雨再分配特征具有重要影响<sup>[20]</sup>。相关研究<sup>[21-22]</sup>表明,林分结构包括冠层间隙、植物生长状况和林冠大小等均影响降雨的输入过程及后续的降雨分配。如较大的长枝半球型柠条比较小的短枝收拢型柠条植株的截留量高,即冠幅较大且枝干夹角越大的植被条件产生的林冠截留相对更高<sup>[23]</sup>;曹云等<sup>[24]</sup>研究表明,树干径流量与基径和冠幅呈显著正相关。此外,郁闭度、林分密度、枝长等植被特征也对降雨再分配模式产生影响<sup>[25-27]</sup>。当郁闭度

降低时,穿透雨量和树干径流量均增加,而冠层截留量则减小<sup>[28]</sup>。植被冠层结构的复杂性是导致降雨在林内产生异质性的关键原因<sup>[29]</sup>,植被的减少改变林分结构状况,间接影响林分内部的空间结构,如林分郁闭度、植被的枝叶重叠度及林窗大小等特征,进而造成降雨分配存在差异性<sup>[30-31]</sup>。

喀斯特区的植被类型以灌木为主,冠层结构较为集中,相较于乔木林及人工经济林等,灌木林的形态特征及生长环境较复杂。因此,针对灌木林降雨分配特征的研究还有很大空间,不同类型降雨下的分配有何差异还不清楚,通过剔除改变其部分冠层结构将对降雨分配产生多大影响也尚不明晰。鉴于此,本研究以喀斯特坡地次生灌木林为研究对象,对比不同比例植被剔除下的降雨分配特征,分析林分郁闭度及冠层结构变化对降雨输入过程的影响,这有利于深入了解植被对降雨的再分配作用,并为适宜条件下提高该地区降雨输入对森林植被和土壤水分的补充提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区河池市环江县(107°50'07"—108°42'57"E, 24°43'44"—25°32'24"N),距离中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站 2 km,海拔 339~501 m。研究区为典型喀斯特坡地,平均坡度 30°,土壤类型为棕色或深色石灰土,沙粒质量分数高,岩石种类为白云岩,土层厚度 0.1~1.0 m。该区属于亚热带季风气候区,年平均气温为 19.9 °C,多年平均降雨量为 1 389 mm。降雨多集中在 4—9 月,为雨季,10 月至翌年 3 月为旱季。本研究选择典型的喀斯特坡地灌木林为研究对象,试验样地属于自然恢复林,植被类型均一,为小乔木或灌木,主要优势树种为欆木(*Loropetalum chinense* (R. Br.) Oliv.)、米念芭(*Tirpitzia ovoidea* Chun & F. C. How ex W. L. Sha)、香叶树(*Lindera communis* Hemsl.)、海金子(*Pittosporum illicioides* Makino)、樟叶荚蒾(*Viburnum cinnamomifolium* Rehder)、清香木(*Pistacia weinmanniifolia* J. Poiss. ex Franch.)和子楝树(*Decaspermum gracilentum* (Hance) Merr. & L. M. Perry)等<sup>[32]</sup>。

### 1.2 试验设计

根据前期实地调查,于 2022 年 11 月开始试验,选取 3 个同坡向同坡位 10 m×10 m 的样地,依据前期文献阅

读和结合实际情况,其中 2 个样地分别进行 30%(TC<sub>30</sub>)和 10%(TC<sub>10</sub>)的植被剔除,对照样地(TC<sub>0</sub>)不进行植被剔除处理。在查清各样地内的树种、数量、树高、冠幅、基径、位置等植被信息后,进行植被剔除处理。

植被剔除时遵循原则:各样地内剔除的植株基径面积和占样地内植株总基径面积的 30%和 10%,并根据计算出的植物剔除数量和基径大小采用蛇形剔除法,植被剔除时需注意剔除的植株砍伐面最好保持水平,树干根部留 30 cm 左右,便于试验结束后植被的恢复。剔除处理后,对不同样地的穿透雨和树干径流及其林外降雨量进行长期监测(2023 年 2—10 月)。样地信息见表 1。

表 1 样地植被信息

Table 1 Vegetation information of the three plots

| 样地               | 植株数量/株 | 郁闭度  | 树高/m      | 冠幅半径/m    | 基径/mm       |
|------------------|--------|------|-----------|-----------|-------------|
| TC <sub>30</sub> | 107    | 0.56 | 2.90±0.95 | 0.40±0.21 | 37.43±25.98 |
| TC <sub>10</sub> | 127    | 0.65 | 3.00±0.97 | 0.44±0.28 | 44.08±37.53 |
| TC <sub>0</sub>  | 164    | 0.68 | 3.18±0.87 | 0.33±0.27 | 38.59±34.48 |

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3 降雨和穿透雨的测定

在样地附近的空旷平坦处放置 3 个林外降雨采集桶(容积为 10 L 的雨量桶),在每个收集桶上,放置适宜大小的圆形漏斗和乒乓球防止桶内水分蒸发,在降雨后,进行测量,记录集水桶内的水量,根据漏斗接雨面积和桶内收集到的雨量体积换算出林外降雨量。在 3 个样地内分别放置容积为 10 L 的穿透雨收集桶,每 2 个桶的间隔不小于 2 m,降雨后及时测定桶内雨量体积,根据穿透雨接雨漏斗的面积计算出穿透雨量,将 5 个点所得的穿透雨量求平均值,以代表整个样地的穿透雨量。2023 年 2—10 月试验期间共监测到降雨事件 24 次。穿透雨量的计算公式为:

$$P_{TF} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \times 10}{n \times A}$$

(1)

式中: $P_{TF}$ 为穿透雨量(mm); $V_i$ 为第  $i$  个桶中穿透雨的体积(mL); $n$  为穿透雨收集桶个数; $A$  为穿透雨收集漏斗的面积( $\text{cm}^2$ )。

1.4 树干径流和冠层截留的测定

根据前期植被特征调查,选取植株数量占比较多,且 3 个样地共有的 7 个优势树种(欆木、米念芭、香叶树、海金子、樟叶荚蒾、清香木、子楝树)为测定对象,各样地内每种树种选取 3 株代表植株收集树干径流,每个样地测定 21 株,3 个样地共 63 株。收集方式:在树高 1 m 处紧贴树皮缠绕 1~2 圈防水铝箔胶带,并用铁丝固定出集雨槽,用 PVC 软管将收集到的雨水导入储水袋内,储水袋固定在正下方,降雨后进行

水量读取。由于降雨量较低时产生树干径流极少,监测到树干径流 19 次。3 个样地内的植株及收集装置分布情况见图 1。树干径流量的计算公式为:

$$P_{SF} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n \times S_p \times 1\,000}$$

(2)

式中: $P_{SF}$ 为树干径流量(mm); $V_i$ 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( $\text{m}^2$ )。

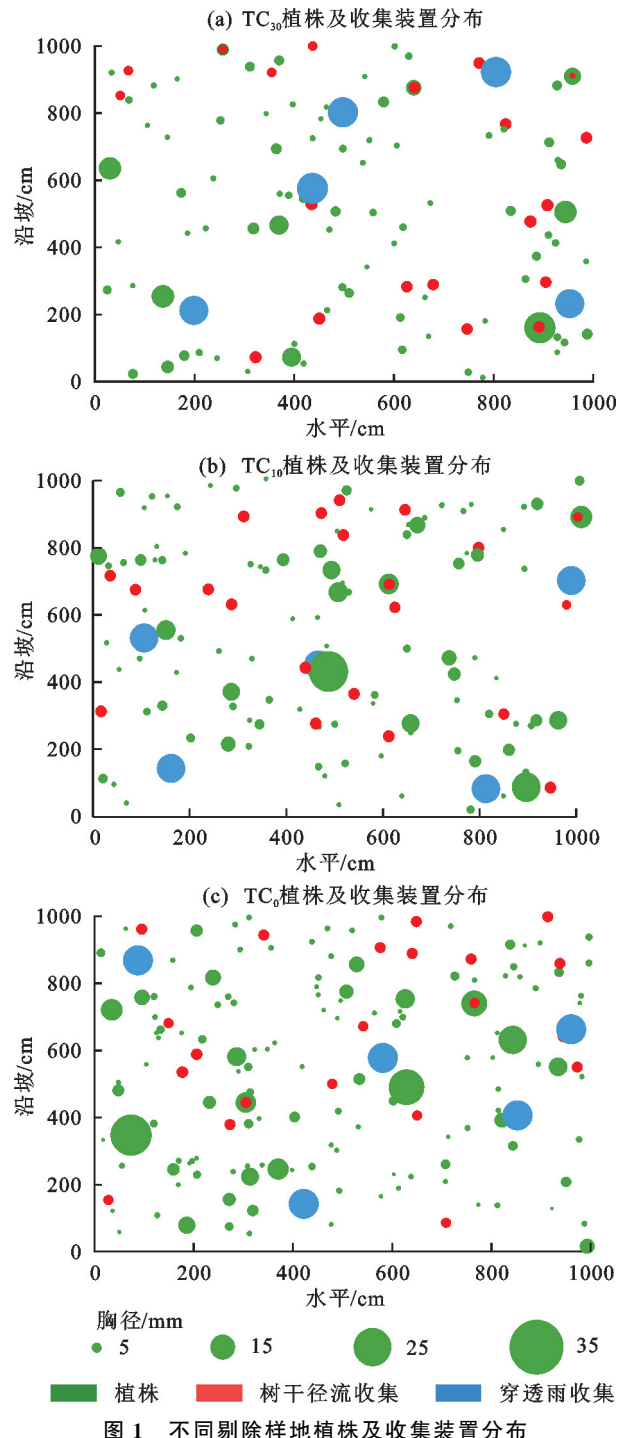


图 1 不同剔除样地植株及收集装置分布

Fig.1 Distribution of plants and collection devices in different exclusion plots



根据水量平衡原理,冠层截留量的计算公式为:

$$P_1=P-P_{TF}-P_{SF} \tag{3}$$

式中: $P_1$ 为冠层截留量(mm); $P$ 为林外降雨量(mm); $P_{TF}$ 为穿透雨量(mm); $P_{SF}$ 为树干径流量(mm)。穿透雨率(%)、树干径流率(%)和冠层截留率(%)分别为该降雨组分与林外降雨量的比值。

1.5 数据处理

采用 Excel 软件对林外降雨量、穿透雨量、树干径流量等数据进行统计和整理,并根据公式计算出穿透雨率、树干径流率和冠层截留率。使用 SPSS 软件进行单因素方差分析,最小显著性差异法(LSD 法)进行多重比较,显著性水平为 0.05,以检验不同降雨量下,不同植被剔除间穿透雨率和树干径流率的差异显著性,使用 Origin 软件完成试验数据图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 降雨分布特征

2023 年 2—10 月试验期间共监测降雨事件 24 场,总降雨量为 652.5 mm,平均降雨量为 27.2 mm,标准差和变异系数分别为 29.7 mm 和 109%,表明降雨量波动较大。单次降雨事件中最大降雨量为 108.0 mm(7 月 20 日),最小降雨量为 2.6 mm(3 月 17 日),其中雨季(4—9 月)降雨量为 560.8 mm,占总降雨量的 85.9%。从降雨强度来看,最大降雨强度为 13.9 mm/h,最小降雨强度为 0.3 mm/h,平均降雨强度为 5.0 mm/h(图 2)。

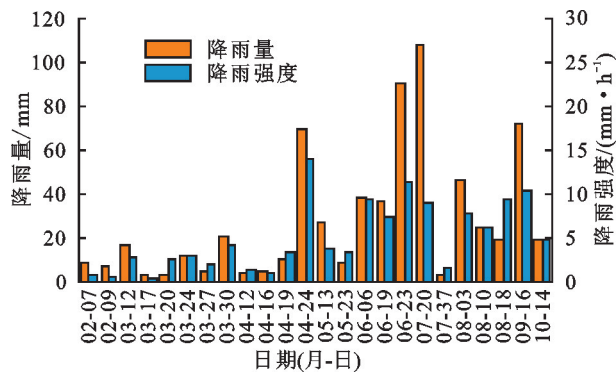


图 2 降雨分布特征

Fig.2 Rainfall distribution characteristics

按中国气象局颁布的降水强度等级划分标准,依据表 2 可知,24 场降雨中出现小雨 8 次、中雨 7 次、大雨 5 次及暴雨 4 次,累积降雨量分别为 44.4、120.5、147.6、340.0 mm,分别占总降雨量的 6.8%,18.5%,22.6%和 52.1%。

从雨量级来看,以小雨、中雨为主,出现 15 次,发生频率为 62.5%;暴雨对总降雨量贡献最大,累积降雨量占总降雨量的比例最大为 52.1%。

2.2 不同剔除模式下穿透雨特征

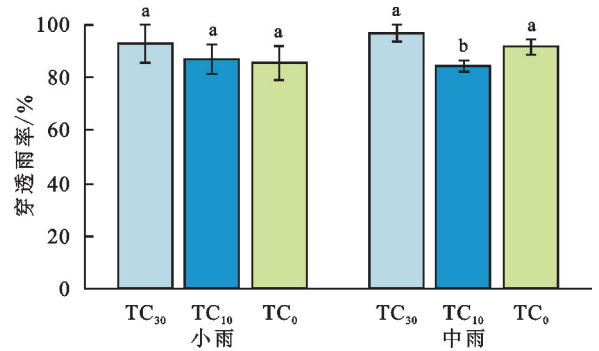
由图 3 可知,在旱季,当降雨类型为小雨时,穿透雨率为  $TC_{30}(92.6\%)>TC_{10}(86.7\%)>TC_0(85.3\%)$ ,植

被剔除比例越大,穿透雨率越高;中雨时,穿透雨率表现为  $TC_{30}(96.6\%)>TC_0(91.4\%)>TC_{10}(84.1\%)$ 。

表 2 研究区域降雨特征统计

Table 2 Statistics of rainfall characteristics in the study area

| 降雨等级/mm        | 降雨次数 | 降雨累计量/mm | 占总降雨量百分比/% |
|----------------|------|----------|------------|
| $0\leq J<10$   | 8    | 44.4     | 6.8        |
| $10\leq J<25$  | 7    | 120.5    | 18.5       |
| $25\leq J<50$  | 5    | 147.6    | 22.6       |
| $50\leq J<100$ | 4    | 340.0    | 52.1       |



注:图中不同小写字母表示相同降雨类型下不同样地间存在显著差异( $p<0.05$ )。下同。

图 3 旱季不同降雨类型下的穿透雨率

Fig.3 Throughfall rate under different types of rainfall in dry season

从图 4 可以看出,在雨季小雨下,穿透雨率与植被剔除度呈正比,大小关系为  $TC_{30}(94.4\%)>TC_{10}(90.2\%)>TC_0(83.4\%)$ ;降雨为中雨时,穿透雨率表现为  $TC_{30}(89.8\%)>TC_0(86.4\%)>TC_{10}(79.8\%)$ ;大雨和暴雨下  $TC_{30}$ 、 $TC_0$ 、 $TC_{10}$  的穿透雨率分别为 89.1%, 80.7%, 72.3% 和 87.3%, 80.1%, 78.5%。

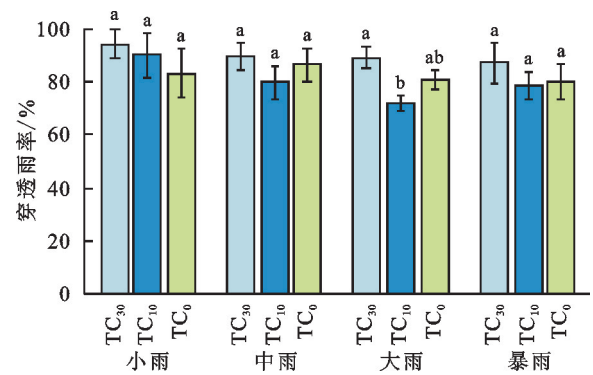


图 4 雨季不同降雨类型下的穿透雨率

Fig.4 Throughfall rate under different types of rainfall in rainy season

整体来看,不同植被剔除间穿透雨率无明显差异。除旱季中雨时,样地  $TC_{30}$  和  $TC_0$  的穿透雨率显著大于样地  $TC_{10}$  的;雨季大雨时,样地  $TC_{30}$  和  $TC_{10}$  的穿透雨率存在显著差异( $p<0.05$ ),其他降雨类型下不同植被剔除间的穿透雨率均无显著差异( $p>0.05$ )。

### 2.3 不同剔除模式下树干径流特征

由图5可知,在旱季,当降雨为小雨时,样地 TC<sub>0</sub>、TC<sub>10</sub>、TC<sub>30</sub>的树干径流率分别为8.1%,6.3%,2.9%;降雨为中雨时,TC<sub>0</sub>、TC<sub>10</sub>、TC<sub>30</sub>样地的树干径流率分别为13.9%,8.1%,5.7%,且样地 TC<sub>0</sub>的树干径流率显著大于 TC<sub>10</sub>和 TC<sub>30</sub>的树干径流率( $p < 0.05$ )。从图6可以看出,在雨季,不同降雨类型下各样地间树干径流率均为 TC<sub>0</sub> > TC<sub>10</sub> > TC<sub>30</sub>。在小雨时,TC<sub>0</sub>、TC<sub>10</sub>、TC<sub>30</sub>样地的树干径流率分别为5.6%,4.8%,2.1%;中雨时,TC<sub>0</sub>、TC<sub>10</sub>、TC<sub>30</sub>样地的树干径流率分别为10.0%,5.5%,5.0%;大雨时,TC<sub>0</sub>、TC<sub>10</sub>、TC<sub>30</sub>样地的树干径流率分别为12.0%,6.5%,6.1%;暴雨时,TC<sub>0</sub>、TC<sub>10</sub>、TC<sub>30</sub>样地的树干径流率分别为9.4%,5.1%,4.9%;在大雨和暴雨下,样地 TC<sub>0</sub>的树干径流率显著大于 TC<sub>10</sub>和 TC<sub>30</sub>的树干径流率( $p < 0.05$ )。

由结果分析表明,剔除植被显著降低树干径流率,在旱季和雨季,树干径流率都与植被剔除比例呈反比,且随降雨量的增加而增加(除暴雨外)。

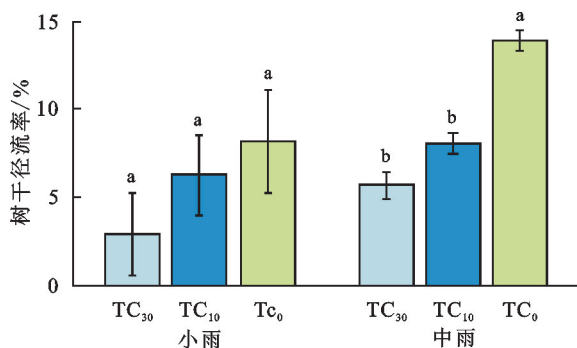


图5 旱季不同降雨类型下的树干径流率

Fig.5 Stemflow rate under different types of rainfall in dry season

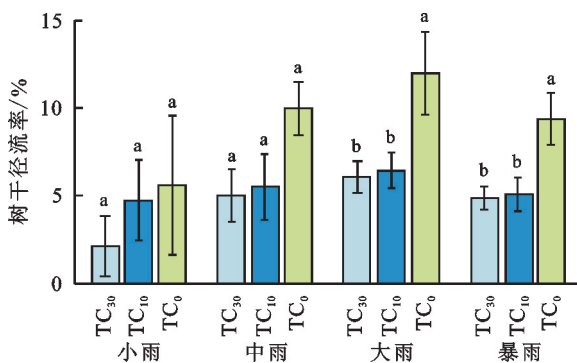


图6 雨季不同降雨类型下的树干径流率

Fig.6 Stemflow rate under different types of rainfall in rainy season

### 2.4 不同剔除模式下降雨分配特征

由表3可知,旱季或雨季,不同剔除处理间降雨分配存在差异。与对照样地 TC<sub>0</sub>相比,旱季和雨季 TC<sub>10</sub>的穿透雨率分别降低3.0%和2.6%,TC<sub>30</sub>的穿透雨率升高6.2%和7.8%,植被剔除度低穿透雨率差

异较小,而剔除度较高时穿透雨率差异较大;相较于 TC<sub>0</sub>,样地 TC<sub>10</sub>、TC<sub>30</sub>旱季和雨季的树干径流率分别降低2.8%,5.7%和4.3%,5.0%;在旱季和雨季,剔除植被30%的冠层截留率均为最低。旱雨季对比发现,不同剔除间穿透雨率在旱季无显著差异,在雨季表现为 TC<sub>30</sub>显著大于 TC<sub>10</sub>和 TC<sub>0</sub>;树干径流率在旱季或雨季均表现为 TC<sub>0</sub>显著较高,而 TC<sub>30</sub>显著较低;雨季和旱季,TC<sub>10</sub>的冠层截留率均显著高于 TC<sub>0</sub>和 TC<sub>30</sub>样地。

表3 各样地旱、雨季降雨分配特征及各组分比率

Table 3 Rainfall distribution characteristics and component ratios in dry and rainy seasons in different plots %

| 季节 | 样地               | 穿透雨率        | 树干径流率     | 冠层截留率      |
|----|------------------|-------------|-----------|------------|
| 旱季 | TC <sub>30</sub> | 94.6±11.0a  | 4.3±1.7b  | 1.1±12.9b  |
|    | TC <sub>10</sub> | 85.4±12.9a  | 7.2±2.6ab | 7.4±18.3a  |
|    | TC <sub>0</sub>  | 88.4±14.0a  | 10.0±4.1a | 1.6±17.8b  |
| 雨季 | TC <sub>30</sub> | 90.1±11.9a  | 4.8±1.9b  | 5.2±11.6b  |
|    | TC <sub>10</sub> | 79.7±14.9b  | 5.5±1.7b  | 14.8±14.6a |
|    | TC <sub>0</sub>  | 82.3±12.8ab | 9.8±3.6a  | 7.9±13.0ab |

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示相同季节不同样地间存在显著差异( $p < 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 不同剔除模式下穿透雨特征

穿透雨是林地补充水分的主要来源,与植被类型、降雨量、林分冠层结构等因素密切相关<sup>[33]</sup>。本研究发现,在旱季和雨季,当降雨量<10 mm时,穿透雨率随植被剔除比例的增加而增加,但不同剔除间无显著差异,与曹恭祥等<sup>[34]</sup>研究间伐强度对华北落叶松林穿透雨和树干径流的影响结论一致。间伐后的落叶松林冠层截留减少而穿透雨增加,但是间伐强度<37.4%时,林分间穿透雨无明显差异。旱季中雨和雨季大雨下,剔除30%的穿透雨率显著高于剔除10%的( $p < 0.05$ ),石磊等<sup>[35]</sup>研究结果也表明,林内穿透雨随降雨量增加表现为先增加后逐渐稳定,当降雨量>20 mm时,穿透雨变异系数基本趋于稳定。本研究中,不同剔除处理间随着降雨量的增加,穿透雨率增加,不同处理间差异逐渐增大,在旱季中雨和雨季大雨时表现出显著性,而暴雨下则无明显差异。产生此现象的原因可能是冠层截留及汇集雨水的能力存在阈值,到达此阈值后穿透雨率也相应趋于稳定<sup>[30]</sup>。林分结构特征的不同导致穿透雨率存在差异<sup>[36]</sup>。TC<sub>30</sub>植株分布稀疏且基径较小,植被剔除度高,林分结构改变大,降雨穿透冠层的面积较大;TC<sub>10</sub>植株分布均匀,基径较大,剔除10%植被对冠层结构的改变较小,其冠幅半径和基径是3个样地中最大的,冠层拦截能力强;TC<sub>0</sub>作为对照样地,无植被剔除,虽郁闭度略大,但冠幅和基径都较小。因此,剔除后的林分结构因素

综合导致  $TC_{30}$  的穿透雨率最大,  $TC_0$  次之,  $TC_{10}$  最小。综上, 不同剔除处理下的穿透雨在各降雨量较小时无显著差异, 而在降雨量较大时产生显著差异, 主要源于降雨量对穿透雨的影响。袁秀锦等<sup>[25]</sup>和刘泽彬等<sup>[26]</sup>的相关研究也表明, 林分结构及密度、郁闭度等植被特征对降雨分配具有一定影响, 然而林分结构仅是影响穿透雨的因素之一, 实际上, 降雨量才是决定穿透雨的主导因素。

### 3.2 不同剔除模式下树干径流特征

树干径流作为雨水输入森林生态系统的另一途径, 可将水分和溶解物质运输至植物根际, 从而为树木生长补充水分和养分<sup>[37]</sup>。森林结构(林分密度、冠层盖度、基径等)及气象因子(降雨量、水分蒸发等)差异造成树干径流的变异<sup>[33]</sup>。本研究结果显示, 在旱雨季不同降雨类型下, 不同剔除间树干径流率均为  $TC_0 > TC_{10} > TC_{30}$ , 在旱季中雨、雨季大雨和雨季暴雨时, 树干径流率为  $TC_0$  样地显著大于  $TC_{10}$  和  $TC_{30}$  样地 ( $p < 0.05$ ), 说明植被剔除导致树干径流率显著降低。因为不进行剔除处理时, 郁闭度较高, 冠层结构较为复杂, 且灌木林树枝与树干的夹角较小, 灌木多呈丛状分布, 汇集和传输雨水的能力较强<sup>[17]</sup>, 且灌木树种叶面积较小, 截留损失也相应较低, 接收雨水更多地转化为树干径流。剔除植被后, 改变原有冠层结构, 减少冠层盖度和树木间枝叶重叠程度, 林分承接降雨的面积降低<sup>[38]</sup>, 产生的树干径流也随剔除植被的比例相应减少, 与在广西亚热带地区不同林地的研究结论相似(即针叶林树干径流量小于阔叶林)<sup>[39]</sup>。不同降雨类型下的结果表明, 树干径流不仅受植被剔除的影响, 降雨量对树干径流也有影响<sup>[40-41]</sup>, 随着降雨量的增加, 不同剔除处理下的树干径流率均增加, 并表现出显著差异。对比旱季、雨季同类型降雨的树干径流发现, 同个样地的树干径流率总是旱季大于雨季。是因为旱季时, 刚进行剔除处理, 林分结构简单, 且植被在旱季存在枯梢现象<sup>[42]</sup>, 冠层叶片脱离可拦截雨水较少, 降雨更多地转化为树干径流和穿透雨; 雨季植被进入生长季, 林分结构变复杂, 叶片和冠层间重叠度增加, 对降雨拦截能力变强, 冠层截留增加, 输入的树干径流降低。

### 3.3 不同剔除模式下降雨分配特征

旱季或雨季, 不同植被剔除间降雨分配存在差异。旱季和雨季相比发现, 不同植被剔除的穿透雨率均为旱季高于雨季; 样地  $TC_0$ 、 $TC_{10}$  的树干径流率为旱季高于雨季,  $TC_{30}$  为雨季高于旱季; 冠层截留率均为雨季远高于旱季。导致此现象的原因可能是在旱季时, 植被枝条、叶片等脱离, 林分冠层间隙较大, 使

旱季植被拦截降雨的能力相对于雨季较弱, 冠层截留率低, 降雨更多地转化为穿透雨和树干径流<sup>[11]</sup>; 而雨季时, 植被进入生长季, 枝繁叶茂, 林分植被盖度增加, 冠层截留增加, 穿透雨和树干径流相应变低<sup>[43]</sup>。CROCKFORD 等<sup>[21]</sup>研究指出, 林分特征如林冠大小、冠层间隙和植物生长状况等因素均影响降雨输入及降雨分配的效果。样地  $TC_0$  无剔除植被,  $TC_{10}$  植被剔除比例小, 旱季和雨季的降雨分配无明显差异; 而  $TC_{30}$  植被剔除比例大, 郁闭度最低, 在旱季时受季节性的影响, 林分稀疏, 降雨量基本转化为穿透雨 (85.4%~94.6%), 冠层截留和树干径流占比小; 雨季时, 植被剔除度越高冠层结构的变化就越大, 随降雨量的增加, 冠层截留增加的同时植株汇集到树干上的径流量也增加<sup>[43]</sup>, 此时穿透雨比例降低, 冠层截留和树干径流率增加。植被结构特征是林内降雨分配存在差异性的重要原因, 植被的剔除改变林分结构状况, 间接影响林分的空间结构组成如郁闭度、冠层间隙和枝叶重叠程度等特征, 进而导致降雨分配存在差异性<sup>[44-45]</sup>。

## 4 结论

(1) 植被剔除对穿透雨的影响不明显。旱雨季不同降雨类型下, 各样地穿透雨率为 72.3%~96.6%, 穿透雨率随剔除比例增加而增加, 在旱季中雨和雨季大雨时, 不同剔除间穿透雨率存在显著差异, 其他条件下不同处理间均无明显差异。随降雨量的增大, 降雨成为穿透雨率的主要影响因素。

(2) 剔除植被导致树干径流率显著降低。旱季或雨季不同降雨类型下, 不同剔除间树干径流率均为  $TC_0 > TC_{10} > TC_{30}$ , 且旱季中雨、雨季大雨和雨季暴雨下  $TC_0$  的样地树干径流率都显著大于  $TC_{10}$  和  $TC_{30}$  的树干径流率 ( $p < 0.05$ )。

(3) 不同剔除处理间降雨分配存在差异。旱季或雨季, 剔除植被 30% 的降雨输入量(穿透雨+树干径流)均为最高(分别为 98.9% 和 94.9%), 此时冠层截留率最低, 剔除植被 30% 一定程度上可提高自然降雨的输入量, 增加植被和土壤可用水量, 提高降雨-土壤水转化效率。

### 参考文献:

- [1] 曹建生, 刘昌明, 张万军. “岩土二元结构”小流域降雨入渗补给地下裂隙潜流过程初步研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(6): 759-763.
- CAO J S, LIU C M, ZHANG W J. Preliminary study on the subsurface flow process of underground fissures supplied by rainfall infiltration in a small watershed with a “binary structure of rock and soil”[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(6): 759-763.
- [2] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展



- 趋势[J].地球科学进展,2007,22(6):573-582.
- WANG S J, LI Y B. Problems and development trends about researches on karst rocky desertification [J]. Advances in Earth Science,2007,22(6):573-582.
- [3] 陈洪松,聂云鹏,王克林.岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展[J].生态学报,2013,33(2):317-326.
- CHEN H S, NIE Y P, WANG K L. Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(2):317-326.
- [4] YANG J, CHEN H S, NIE Y P, et al. Dynamic variations in profile soil water on karst hillslopes in Southwest China[J].Catena,2019,172:655-663.
- [5] 魏兰兰.黄土高原浅层土壤水分对降水的响应机制研究:以董志塬为例[D].兰州:兰州大学,2022.
- WEI L L. Response mechanism of shallow soil moisture to precipitation in Loess Plateau [D].Lanzhou: Lanzhou University,2022.
- [6] 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.
- 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.
- [7] 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.
- [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] 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.
- SUN S Q, WANG Y J, WANG Y Q, et al. Rainfall process and nitrogen input in three typical forests of Jinyun Mountain [J]. Environmental Science, 2014, 35(3):1081-1090.
- [10] 杜妍,孙永涛,李宗春,等.苏南马尾松林分冠层水文过程对降雨的响应特征[J].北京林业大学学报,2019,41(6):120-128.
- DU Y, SUN Y T, LI Z C, et al. Response of hydrological processes of *Pinus massoniana* forest to rainfall in southern Jiangsu Province of Eastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University,2019,41(6):120-128.
- [11] 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.
- [12] 杨宪龙.黄土高原北部典型灌丛降水再分配特征及其蒸散耗水规律[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- YANG X L. Characteristics of rainfall redistribution and evapotranspiration for typical shrub species on the Northern Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2016.
- [13] HONDA E A, MENDONÇA A H, DURIGAN G. Factors affecting the stemflow of trees in the Brazilian Cerrado [J].Ecohydrology,2015,8(7):1351-1362.
- [14] 张腊梅,刘新平,赵学勇,等.小叶锦鸡儿灌丛不同部位穿透雨特征[J].干旱区资源与环境,2014,28(3):187-191.
- ZHANG L M, LIU X P, ZHAO X Y, et al. The throughfall characteristics in different position of *Caragana microphylla* shrub [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2014,28(3):187-191.
- [15] 孙忠林,王传宽,王兴昌,等.两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.
- SUN Z L, WANG C K, WANG X C, et al. Rainfall redistribution patterns and their influencing factors of two temperate deciduous forests [J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(14):3978-3986.
- [16] 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.
- [17] 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].银川:宁夏大学,2021.
- WANG T T. Traits and influencing factors of rainfall redistribution of three typical shrubs canopy in the Mu us Sandy Land [D].Yinchuan: Ningxia University,2021.
- [18] 荐圣淇,赵传燕,方书敏,等.黄土高原丘陵沟壑区柠条和沙棘灌丛的降雨截留特征[J].应用生态学报,2012,23(9):2383-2389.
- JIAN S Q, ZHAO C Y, FANG S M, et al. Characteristics of rainfall interception by *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* in Loess Plateau of Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2012,23(9):2383-2389.
- [19] 李道宁,王兵,蔡体久,等.江西省大岗山主要森林类型降雨再分配特征[J].应用生态学报,2014,25(8):2193-2200.
- LI D N, WANG B, CAI T J, et al. Rainfall redistribution traits of three main forest types in Dagangshan Mountains of Jiangxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(8):2193-2200.

- [20] 王淑春,程然然,杜盛.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[J].水土保持学报,2022,36(3):173-180.
- WANG S C, CHENG R R, DU S. Characteristics and main influencing factors of rainfall partitioning in two typical forests in the Loess Hilly Region[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(3):173-180.
- [21] 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(1617):2903-2920.
- [22] MOLINA A J, DEL CAMPO A D. The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations[J].Forest Ecology and Management,2012,269:206-213.
- [23] 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.
- AI C J. Throughfall and its controlling factors of typical xerophytic shrubs in the Loess Plateau of China[D].Beijing: China University of Geosciences,2018.
- [24] 曹云,黄志刚,欧阳志云,等.湖南省张家界马尾松林冠生态水文效应及其影响因素分析[J].林业科学,2006,42(12):13-20.
- CAO Y, HUANG Z G, OUYANG Z Y, et al. Eco-hydrological effect of *Pinus massoniana* canopy and its influence factors in Zhangjiajie of Hunan Province[J].Scientia Silvae Sinicae,2006,42(12):13-20.
- [25] 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].生态学报,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.
- [26] 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.
- [27] LEVIA D F J, 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.
- [28] 周彬,韩海荣,康峰峰,等.太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征[J].生态学报,2013,33(5):1645-1653.
- ZHOU B, HAN H R, KANG F F, et al. Characteristics of precipitation distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain[J].Acta Ecologica Sinica,2013,33(5):1645-1653.
- [29] 战伟庆,张志强,武军,等.华北油松人工林冠层穿透雨空间变异性研究[J].中国水土保持科学,2006,4(3):26-30.
- ZHAN W Q, ZHANG Z Q, WU J, et al. Spatial variability of throughfall in forest canopy layer of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis*) plantation in Northern China[J].Science of Soil and Water Conservation,2006,4(3):26-30.
- [30] 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.
- [31] 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,2017,601:1824-1837.
- [32] 董天富.喀斯特不同土地利用方式下出露岩石对岩周土壤水分再分配的影响[D].贵阳:贵州大学,2023.
- DONG T F. Effects of exposed rocks on soil moisture redistribution around karst under different land use patterns[D].Guiyang: Guizhou University,2023.
- [33] 黄团冲,贺康宁,王先棒.青海大通白桦林冠层降雨再分配与冠层结构关系研究[J].西北林学院学报,2018,33(3):1-6.
- HUANG T C, HE K N, WANG X B. Relationship between rainfall redistribution and canopy structure of *Betula platyphylla* canopy in Datong, Qinghai[J].Journal of Northwest Forestry University,2018,33(3):1-6.
- [34] 曹恭祥,王云霓,王彦辉,等.间伐强度对华北落叶松林穿透雨和树干茎流的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(3):79-85.
- CAO G X, WANG Y N, WANG Y H, et al. Effects of thinning intensity on throughfall and stemflow of *Larix principis-ruprechtii* plantations[J].Science of Soil and Water Conservation,2018,16(3):79-85.
- [35] 石磊,盛后财,满秀玲,等.兴安落叶松林降雨再分配及其穿透雨的空间异质性[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(2):90-96.
- SHI L, SHENG H C, MAN X L, et al. Rainfall redistribution and the spatial heterogeneity of throughfall in *Larix gmelinii* forest, Northeast China[J].Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2017,41(2):90-96.
- [36] 孙增慧,张卫华.植被冠层对降雨空间分布特征及土壤侵蚀影响的研究[J].土地开发工程研究,2016(6):43-49.
- SUN Z H, ZHANG W H. Effects of crop cover on the horizontal distribution characteristics of rainfall and soil erosion [J]. Land Development and Engineering Research,2016(6):43-49.



- [23] SOKOL N W, SANDERMAN J, BRADFORD M A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 12-24.
- [24] COTRUFO M F, RANALLI M G, HADDIX M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 989-994.
- [25] ZHANG H L, DENG Q, HUI D F, et al. Recovery in soil carbon stock but reduction in carbon stabilization after 56-year forest restoration in degraded tropical lands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 441: 1-8.
- [26] 黄超, 魏虹, 吴科君, 等. 马尾松林向香樟林改造林下植物功能多样性研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4573-4584.
- HUANG C, WEI H, WU K J, et al. The functional diversity of understory plants during the transformation from *Pinus massoniana* to *Cinnamomum Camphora* forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4573-4584.
- [27] NONGHULOO I M, KHARBHIIH S, SUCHIANG B R, et al. Production, decomposition and nutrient contents of litter in subtropical broadleaved forest surpass those in coniferous forest, Meghalaya[J]. *Tropical Ecology*, 2020, 61(1): 5-12.
- [28] BERGKEMPER F, SCHÖLER A, ENGEL M, et al. Phosphorus depletion in forest soils shapes bacterial communities towards phosphorus recycling systems[J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(8): e2767.
- [29] 姜永孟, 邓翠, 吕茂奎, 等. 红壤侵蚀区马尾松林恢复过程中土壤异养呼吸及微生物多样性的变化特征[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 1156-1168.
- JIANG Y M, DENG C, LYU M K, et al. Changes in soil heterotrophic respiration and its microbial diversity during restoration of *Pinus massoniana* plantations in eroded red soil area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(4): 1156-1168.
- [30] YANG Y S, GUO J F, CHEN G S, et al. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2009, 323(1): 153-162.
- [31] FENG J G, HE K Y, ZHANG Q F, et al. Changes in plant inputs alter soil carbon and microbial communities in forest ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(10): 3426-3440.
- (上接第 322 页)
- [37] 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.
- [38] 张雪. 祁连山东段典型灌丛降雨再分配特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- ZHANG X. Study on rainfall redistribution characteristics of typical shrubs in the eastern section of Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [39] 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.
- [40] 李向富. 三峡库区不同林地降雨再分配过程研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2019.
- LI X F. Study on rainfall redistribution process of different woodlands in Three Gorges Reservoir Area [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2019.
- [41] 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.
- [42] 刘建立, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山叠叠沟小流域华北落叶松人工林的冠层降水再分配特征[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 76-81.
- LIU J L, WANG Y H, YU P T, et al. Characteristics of rainfall redistribution under the canopy of *Larix Principis-rupprechtii* forest in Diedieyou watershed of Liupanshan Mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 76-81.
- [43] 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.
- MA C K. Study on the ecohydrological processes of black locust forest land on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [44] 张勇波, 谢江, 陈国云, 等. 西双版纳不同树龄橡胶林对降雨的再分配特征[J]. *热带生物学报*, 2022, 13(1): 57-63.
- ZHANG Y B, XIE J, CHEN G Y, et al. Characteristics of rainfall redistribution of rubber plantations at different ages in Xishuangbanna[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2022, 13(1): 57-63.
- [45] 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.