

皖南山区典型板栗林地降雨再分配特征

邸明婷¹, 曲雪铭¹, 刘刚^{1,2}, 张琼^{1,2},

夏小林³, 刘旦旦³, 陈磊³, 汪邦稳³, 严晰芹³, 郭珍⁴

[1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),

水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.安徽省(水利部 淮河水利委员会)水利科学研究院

(安徽省水利工程质量检测中心站), 合肥 230088; 4.四川华标检测技术有限公司, 四川 成都 610097]

摘 要: [目的] 探究降雨特征、冠层结构特征和不同经营强度对板栗林地降雨再分配的影响, 揭示林下水分输入的关键调控过程, 为协调板栗林的生产与生态功能提供科学依据。[方法] 以皖南山区典型板栗林地研究对象, 通过 2025 年 6 月 5 日至 2025 年 8 月 1 日的降雨监测, 分析了板栗林降雨再分配过程、水量平衡特征及降雨再分配的影响因素。[结果] ①板栗林降雨再分配各组分与林外降雨量关系密切。林下穿透雨量、树干茎流量及林冠截留量均随降雨量的增加而线性增加, 穿透雨率和树干茎流率则随降雨量呈对数函数增加, 林冠截留率呈对数函数减小, 林地表层土壤含水量与降雨量也呈正相关关系。②回缩修剪样地的穿透雨量、树干茎流量均低于未修剪样地; 但林地表层土壤含水量高于未修剪样地。③板栗林地穿透雨量(率)、树干茎流量(率)、林冠截留量和土壤含水量与降雨量均呈显著的正相关关系, 林地表层土壤含水量与冠幅和树高呈显著负相关关系。[结论] 板栗林降雨再分配各组分主要受降雨量驱动。回缩修剪能够明显降低穿透雨和树干茎流, 并提高林地表层土壤含水量。

关键词: 经果林; 降雨再分配; 穿透雨; 树干茎流; 林冠截留

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)04-0095-10

中图分类号: S715, S715.2

文献参数: 邸明婷, 曲雪铭, 刘刚, 等. 皖南山区典型板栗林地降雨再分配特征[J]. 水土保持通报, 2026, 46(4): 95-104. Di Mingting, Qu Xueming, Liu Gang, et al. Rainfall redistribution characteristics of typical *Castanea mollissima* forests in mountainous area of southern Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 95-104.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.030

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.04.030

Rainfall redistribution characteristics of typical *Castanea mollissima* forests in mountainous area of southern Anhui Province

Di Mingting¹, Qu Xueming¹, Liu Gang^{1,2}, Zhang Qiong^{1,2},

Xia Xiaolin³, Liu Dandan³, Chen Lei³, Wang Bangwen³, Yan Xiqin³, Guo Zhen⁴

[1.State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and

Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Anhui Provincial Water Resources Research Institute, Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources (Anhui Provincial Water Engineering Quality

Testing Center), Hefei 230088, China; 4.Sichuan Huabiaoce Testing Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610097, China]

Abstract: [Objective] The effects of rainfall characteristics, canopy structural characteristics and different management intensities on rainfall redistribution in *Castanea mollissima* forests were investigated, and the key regulatory processes of understory water input were revealed, in order to provide a scientific basis for coordinating the production and ecological functions of *C. mollissima* forests. [Methods] Taking typical *C. mollissima* forests in

收稿日期: 2026-02-03

修回日期: 2026-03-01

采用日期: 2026-03-12

资助项目: 安徽省自然科学基金水科学联合基金“经果林地地面水系整治与土壤侵蚀防治技术研究”(2308085US14); 水利水資源安徽省重点实验室开放研究资助项目(2023SKJ03)

第一作者: 邸明婷(2001—), 女(汉族), 甘肃省兰州人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: 3260105317@qq.com。

通信作者: 刘刚(1982—), 男(汉族), 陕西省西安人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。Email: gliu@foxmail.com。

the mountainous area of southern Anhui Province as the study object, rainfall monitoring was conducted from June 5 to August 1, 2025 to analyze the rainfall redistribution process, water balance characteristics, and influencing factors in *C. mollissima* forests. [Results] ① The components of rainfall redistribution in *C. mollissima* forests were closely related to the rainfall outside the forest. The throughfall, stemflow and canopy interception all increased linearly with increasing rainfall. The throughfall rate and stemflow rate increased logarithmically with rainfall, canopy interception rate decreased logarithmically, and surface soil water content was positively correlated with rainfall. ② Throughfall and stemflow in the heading-back pruned plots were lower than those in the unpruned plots, whereas surface soil water content was higher in the pruned plots. ③ Throughfall (rate), stemflow (rate), canopy interception, and surface soil water content were all significantly positively correlated with rainfall, and surface soil water content was significantly negatively correlated with crown width and tree height. [Conclusion] Rainfall redistribution in *C. mollissima* forests is mainly driven by rainfall. Heading-back pruning can significantly reduce throughfall and stemflow and increase surface soil water content.

Keywords: economic fruit forests; rainfall redistribution; throughfall; stemflow; canopy interception

植被冠层对降雨的截留和再分配是土壤-植物-大气连续体中水文循环过程的重要环节。林地降雨再分配不仅能调控降雨的空间分布、驱动森林生态系统水文循环与物质迁移,也是揭示森林生态系统水文调节功能与响应机制的核心^[1-3]。因此,林地降雨再分配过程的研究具有重要的科学意义。

森林植被对降雨的再分配效应是影响降雨输入林地的关键要素^[4]。林地冠层将大气降雨重新分配为穿透雨、树干茎流和冠层截留3个核心部分^[5]。其中,林地穿透雨是降雨透过植被冠层后输入地表的关键水文通量,也是土壤水分的重要来源^[6];降雨沿植被叶片、枝条和树干向下运动,汇集至植物底部,并向深层土壤补给的部分为树干茎流^[7],植被冠层截留是指大气降水中被植被枝叶拦截吸收和降雨后冠层蒸发损失的部分^[8]。在林地降水再分配的复杂过程中,降雨量、降雨强度、降雨历时等降雨特征,是影响冠层降雨再分配模式的关键因素。除此之外,林地树种组成、冠层结构、林分密度和叶面积指数等也是主导林地降雨再分配空间异质性的内在因素^[9-11]。Zhang Wanjun等^[12]基于2001—2022年长期的降水监测,研究了华南亚热带森林演替过程中降水再分配特征,发现降雨特征和森林组成结构是林内穿透雨和树干茎流变化的主要驱动因素。Ma Changkun等^[13]以黄土高原半干旱区刺槐林为研究对象,研究了冠层结构对降雨截留损失和冠层截留能力的影响,发现叶面积指数、胸径、树高和林分密度等都是影响林地冠层截留特征的主要因素。李振新等^[14]以四川西部的卧龙自然保护区为研究对象,分析了岷江冷杉林下穿透雨的空间分布特征,发现林下穿透雨在降雨特征及森林冠层特征的影响下具有很大的空间变异性。

根据安徽省林业局发布的第九次全国森林资源清查数据,安徽省经济林面积为 $5.41 \times 10^5 \text{ hm}^2$,板栗

林面积为 $7.12 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占安徽省经济林面积的13.17%。板栗林是一种广泛分布于山地丘陵区典型经果林,是重要的木本粮油作物,其产业的可持续发展能够为生产生活提供原料、有利于提高农户的经济收入,此外也具有改善土壤理化性质和防治水土流失的生态效益^[15]。当前一些学者研究了天然林与部分人工林中降雨再分配的基本规律。然而,经果林与一般的天然林和人工林在经营管理方面有所不同。板栗林种植过程中,农户为实现高产稳产实施了整形修剪、疏伐等经营措施,其冠层结构、枝叶分布及林分特性与自然林和一般人工林分有所不同,这会对降雨再分配过程产生较大影响。目前对人为集约化经营的经果林冠层水文过程认知仍存在不足,从而制约了板栗林的生产与生态功能协调管理。

本研究选取皖南山区特色板栗林为研究对象,定量测定其不同降水条件下的穿透雨、树干茎流和冠层截留,分析降雨特征、冠层结构特征和不同经营强度对板栗林地降雨再分配的影响。旨在明确板栗林降雨再分配各组分对降雨特征的响应,认识板栗林降雨再分配过程及其水量平衡特征,揭示回缩修剪这一关键经营措施对降雨再分配过程及林下表层土壤水分含量的影响,探究板栗林降雨再分配的主要影响因子。研究结果将有助于理解冠层降雨再分配对林下地表径流削减与水源涵养的潜在调控作用,为充分发挥板栗林的水土保持效应提供理论基础。同时可为评估林下土壤水分状况和优化灌溉与管理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽省广德市($119^{\circ}02' - 119^{\circ}40' \text{ E}$, $30^{\circ}37' - 31^{\circ}12' \text{ N}$),地处皖南山地与沿江平原的过渡

地带,地形较为复杂,南部以低山为主,中部以台地、平原为主,北部以丘陵为主,海拔高度为 113 m,土壤类型为黄壤。该地属亚热带季风海洋性气候,气候温和,四季分明,雨热同季,全年无霜期平均 218 d,多年平均气温 15.7 ℃,多年平均降雨量 1 379.1 mm,降水趋势自南向北逐渐减少。

板栗(*Castanea mollissima*),壳斗科栗属乔木,树皮深灰色,不规则深纵裂。枝条灰褐色,有纵沟。叶长椭圆形或长椭圆状披针形,叶缘有锯齿。细根发达,分布很广。耐寒、耐旱,喜砂质土壤。回缩修剪是板栗林经营过程中常见的管理措施,主要是通过

对树冠外围过长、过弱的多年生枝条进行短截,进而缩小树冠,保留较强的分枝,通风透光,有利于促进板栗丰产。

研究区共有 6 块用于长期观测水土流失的板栗林样地(119°24′46.51″E, 30°46′40.97″N),其中 3 块相连样地(1 号、2 号、3 号)的板栗经过回缩修剪,另外 3 块相连样地(4 号、5 号、6 号)未被修剪,1 号、2 号、3 号样地和 4 号、5 号、6 号样地坡向和坡位一致。样地基本特征见表 1。本研究的样地代表了两种典型的板栗林冠层结构,回缩修剪是导致板栗林冠层结构产生差异的主要原因,本研究旨在比较这两种冠

层结构对降雨再分配的影响,将修剪强度视为冠层结构出现差异的综合因子。

表 1 样地基本特征
Table 1 Basic characteristics of sample plots

编号	坡度/ (°)	修剪强度	平均 树高/m	平均 冠幅/m	平均冠幅 面积/m ²
1	30~35	回缩修剪	2.20	2.01	4.14
2	30~35	回缩修剪	2.33	2.12	4.55
3	30~35	回缩修剪	2.50	2.16	4.48
4	30~35	未修剪	6.90	4.87	23.43
5	30~35	未修剪	6.27	4.72	22.08
6	30~35	未修剪	7.17	4.83	23.19

于 2025 年 6 月 5 日晴朗无风的午间通过无人机航拍获得了观测样地的正射影像。图 1 是截取的部分未修剪和回缩修剪的板栗林影像。未修剪样地的板栗仍处于盛花期,而修剪后的样地中板栗未处于花期,这一差异可能与回缩修剪处理有关,已有研究表明,修剪措施对板栗林营养生长和花芽分化有明显影响^[16],回缩修剪对板栗林花期产生调控作用,导致同一地区回缩修剪的板栗林与未修剪的板栗林花期出现差异。



图 1 观测样地俯视示意图
Fig.1 Schematic diagram of top view of observation plots

1.2 观测仪器布设

在观测板栗林地附近的空地布设 RG3-M 雨量记录仪自动观测记录研究区降雨量和降雨时间,该雨量计为翻斗式雨量计,每接收 0.2 mm 降雨记录一次,设置每 5 min 记录温度一次。观测时间为 2025 年 6 月 5 日至 2025 年 8 月 1 日。分别在观测小区内坡上、中、下 3 个部位各放置 2 个容积为 1 L,开口直径为 132.3 mm 的透明塑料桶用于收集降雨过程中的林下穿透雨,每次降雨后及时用量筒测量桶内收集的

穿透雨量体积,根据塑料桶接收降雨的面积计算穿透雨量。在板栗林经回缩修剪的样地(1,2,3 号小区)和未经修剪的样地(4,5,6 号小区)分别选取树高和冠幅投影面积在样地平均范围的典型板栗树,利用 TPE 材质防水软垫在板栗树干上包裹一个漏斗型的集水器,下端开口连接一段透明塑料软管作为引流管,软管另一端穿过塑料桶盖中央的预制孔伸入桶内,所有缝隙均用玻璃胶进行密封,并用水进行密封性检验,保证集水器底部完全密封。在每次降雨

结束后立即收集塑料桶内的树干茎流并用量筒进行测量记录。在每个观测样地坡面不同位置布设 12 个土壤水分传感器(RS485 土壤单水分)用于测定板栗林地表层土壤含水量,土壤水分传感器布设于地表以下 5—10 cm 深度处,每次降雨结束后使用配套的土壤多参数记录仪记录土壤含水量。

1.3 数据处理方法

以观测小区内所有穿透雨量的均值代表整个观测小区的穿透雨量,具体公式如公式(1)所示:

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

式中: P_{TF} 为穿透雨量(mm); V_i 为第*i*个穿透雨收集桶中降雨的体积(ml); n 为穿透雨收集桶个数; A 为穿透雨收集桶接收降雨的面积(cm^2)。下同。

每次降雨后的林下穿透雨量与林外降雨量的比值为林地穿透雨率[公式(2)]。

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

式中: R_{TF} 为穿透雨率(%); P 为林外降雨量(mm)。

将样地林地树干茎流观测点分别求均值代表回缩修剪和未修剪的树干茎流,具体计算公式如下所示:

$$P_{SF} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n \times S_p \times 10\,000} \quad (3)$$

式中: P_{SF} 为树干茎流量(mm); V_i 为第*i*个树干茎流收集桶中的茎流体积(ml); n 为树干茎流收集桶个数; S_p 为用于树干茎流观测的平均冠幅面积(m^2)。

树干茎流率为每次降雨后林地树干茎流量与林外降雨量的比值[公式(4)]。

$$R_{SF} = \frac{P_{SF}}{P} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R_{SF} 为树干茎流率(%).

依据水量平衡原理估算林地冠层截留量,具体计算公式如公式(5)所示:

$$P_I = P - (P_{TF} + P_{SF}) \quad (5)$$

式中: P_I 为冠层截留量(mm); P_{TF} 为穿透雨量(mm);下同。

林地冠层截留率 R_I 为每次降雨后林地冠层截留量与林外降雨量的比值[公式(6)]。

$$R_I = \frac{P_I}{P} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_I 为林地冠层截留率(%); P_I 为林地冠层截留量(mm)。

所有观测数据采用 Excel 进行统计和处理,利用 SPSS 软件进行相关性分析,利用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 观测期天然降雨特征

降雨观测期间降雨日共有 29 d,总降雨量为 493.2 mm,占多年平均降雨量的 35.76%。观测期内日降雨量最少为 0.2 mm(6月28日),最大为 57.6 mm(6月22日),日平均降雨量为 17.01 mm,标准差为 16.42 mm,变异系数为 96.52%,说明观测期内该地降雨量波动较大。根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012)划分,观测期间 24 h 降雨量在 0.1~9.9 mm 范围内的小雨有 15 场,占总降雨场次的 51.72%,小雨累计降雨量为 69.6 mm,占总降雨量的 14.11%;24 h 降雨量在 10.0~24.9 mm 范围内的中雨有 6 场,占总降雨量的 20.69%,中雨累计降雨量为 99.4 mm,占总降雨量的 20.15%;24 h 降雨量在 25.0~49.9 mm 范围内的大雨有 6 场,占总降雨量的 20.69%,大雨累计降雨量为 213.8 mm,占总降雨量的 43.35%;24 h 降雨量在 50.0~99.9 mm 范围内的暴雨有 2 场,占总降雨量的 6.90%,暴雨累计降雨量为 110.4 mm,占总降雨量的 22.38%。可见,观测期内该地主要以小雨为主,且小雨的累计降雨量对总降雨量的影响较小;大雨虽在观测期内发生的频次并不高,但其累计降雨量对总降雨量的影响较大。

观测期内收集到有效穿透雨和树干茎流的降雨共 15 场。根据表 2 可知,观测期内有效降雨小雨 6 场、中雨 5 场、大雨 3 场、暴雨 1 场,累计降雨量占总降雨量的百分比分别为小雨 16.65%,中雨 28.02%,大雨 36.70%,暴雨 18.63%。由此可见,观测期内以小雨和中雨为主,占总降雨量的 73.33%,大雨虽发生频次最低,但对总降雨量贡献最大。

2.2 板栗林冠层降雨分配特征

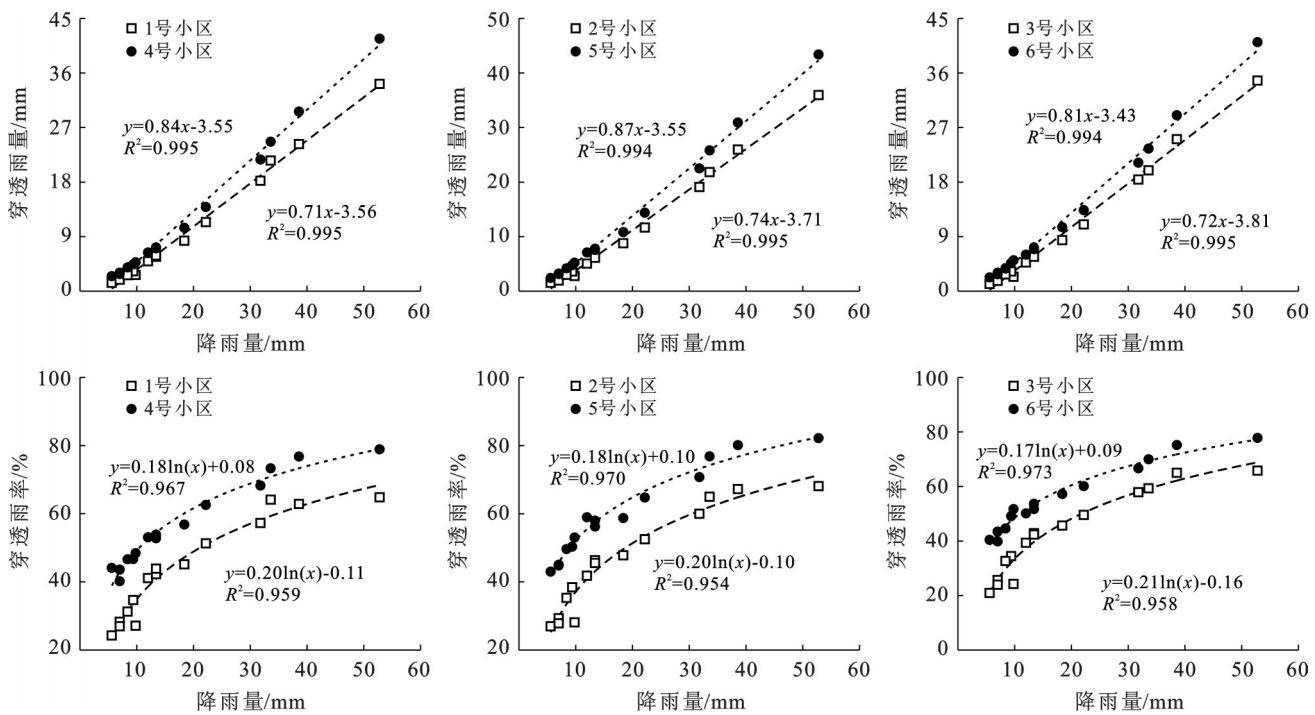
2.2.1 板栗林林下穿透雨特征

通过进行拟合分析,6 个观测小区的穿透雨量和穿透雨率随林外降雨量的变化情况如图 2 所示。6 个观测小区中,林下穿透雨量与林外降雨量呈显著的线性相关关系。当林外降雨量为观测期内最小降雨量 5.6 mm 时,6 个观测小区中穿透雨量分别为 1.36 mm, 1.51 mm, 1.17 mm, 2.47 mm, 2.41 mm, 2.26 mm,随着降雨量的增加,林下穿透雨量也呈增加趋势。在整个观测期内,板栗林地穿透雨率的范围为 20.91%~82.17%,穿透雨率随降雨量的增加也呈增加趋势,但当林外降雨量大于 30 mm 时,穿透雨率

随林外降雨量增加的增速变缓。总体而言,6个观测小区的穿透雨率随降雨量增加呈现对数增加趋势,且对数曲线拟合 R^2 均大于0.95。除此之外,回缩修剪对林下穿透雨也有一定的影响,从图2中可以看出,板栗树经回缩修剪的观测小区内林下穿透雨量和穿透雨率均小于未经修剪的观测小区。其中,经回缩修剪的观测小区内林下穿透雨量平均比未经修剪的观测小区小19.20%,经回缩修剪的观测小区内林下穿透雨率平均比未经修剪的观测小区小23.93%。

表2 观测期内降雨量特征
Table 2 Characteristics of rainfall during observation period

降雨量等级/mm	观测期内总降雨量特征				观测期内有效降雨特征			
	降雨频次/次	占总降雨比例/%	累计降雨量/mm	占总降雨总量比例/%	降雨频次/次	占有效降雨比例/%	累计降雨量/mm	占有效降雨总量比例/%
小雨($0.1 \leq P < 10.0$)	15	51.72	69.6	14.11	6	40.00	47.2	16.65
中雨($10.0 \leq P < 25.0$)	6	20.69	99.4	20.15	5	33.33	79.4	28.02
大雨($25.0 \leq P < 50.0$)	6	20.69	213.8	43.35	3	20.00	104	36.70
暴雨($50.0 \leq P < 100.0$)	2	6.90	110.4	22.38	1	6.67	52.8	18.63



注:1,2,3号小区为回缩修剪的板栗林地;4,5,6号小区分别为与1,2,3号小区立地条件相同的未修剪的板栗林地

图2 板栗林林下穿透雨特征
Fig.2 Characteristics of throughfall under *Castanea mollissima* forests

2.2.2 板栗林树干茎流特征

经过拟合分析,观测样地树干茎流量和树干茎流率随林外降雨量的变化情况如图3所示。当林外降雨量为5.6 mm时,经过回缩修剪的板栗林树干茎流量平均为0.97 mm,未修剪的板栗林地树干茎流量平均为1.20 mm,板栗林地的树干茎流量随林外降雨量的增加呈显著的线性增加趋势,回缩修剪处理后板栗林树干茎流降低了19.17%。观测期内,经过回缩修剪的板栗林树干茎流率为1.06%~5.69%,未修剪的板栗林地树干茎流率为1.79%~8.37%,板栗林

地的树干茎流率随林外降雨量的增加呈显著的对数函数增加趋势,回缩修剪处理后板栗林树干茎流率降低了33.33%。

2.2.3 板栗林林冠截留特征

观测期内,不同降雨条件下经过回缩修剪的板栗林林冠截留量平均为7.90 mm,未经回缩修剪的板栗林林冠截留量平均为7.33 mm。从图4中可以看出,经过回缩修剪和未经过修剪的板栗林林冠截留量均随降雨量的增加而增加,且呈线性增加趋势。不同降雨条件下经过回缩修剪的板栗林林冠截留率

为 28.23%~72.90%，未经回缩修剪的板栗林林冠截留率为 24.55%~71.26%。板栗林林冠截留率与林

外降雨量之间呈对数函数负相关关系，随着降雨量的增大，林冠截留率减少并逐步趋近于稳定。

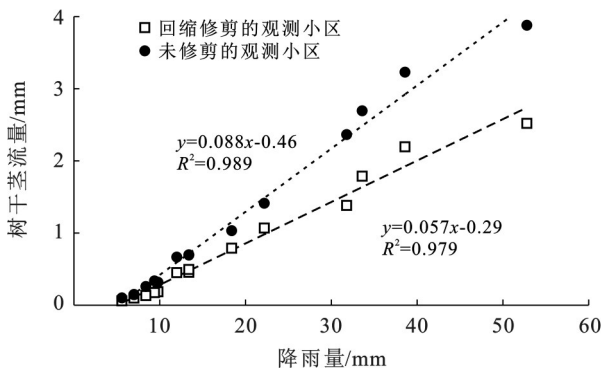


图 3 板栗林树干茎流特征

Fig.3 Stemflow characteristics of *C. mollissima* forests

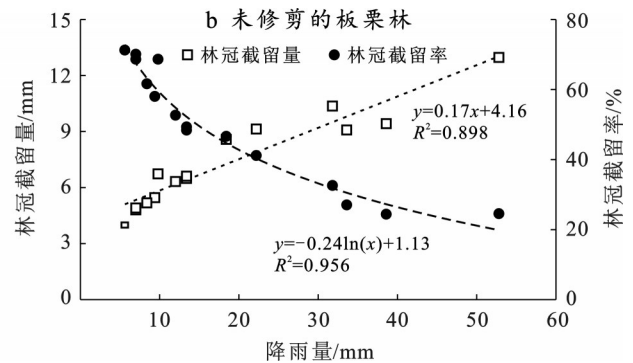
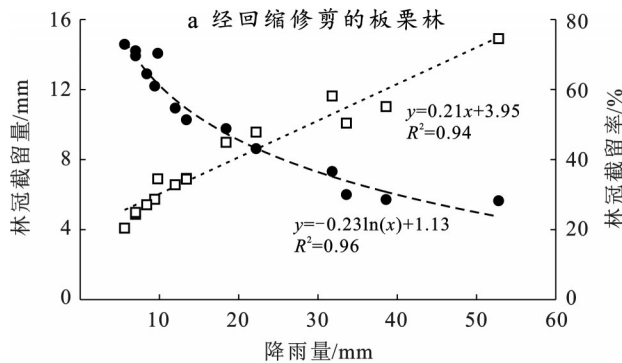
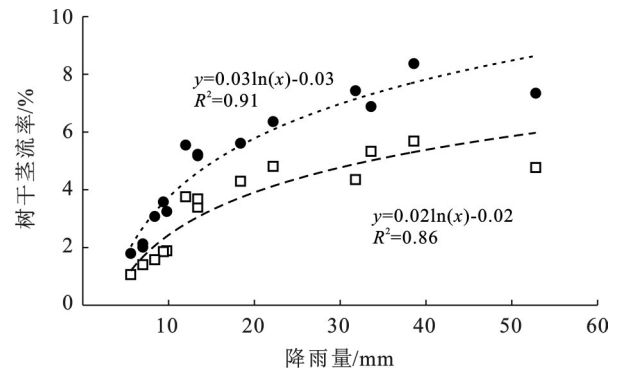


图 4 板栗林林冠截留特征

Fig.4 Canopy interception characteristics of *C. mollissima* forests

2.3 板栗林地土壤表层含水量变化特征

观测期内每次降雨后板栗林地表层土壤含水量与降雨量的响应关系如图 5 所示，当降雨量大时，板栗林地土壤含水量较高。观测期间有连续降雨情况出现，因此出现了小降雨量条件下土壤含水量高的情况。从图 5 中可以看出，回缩修剪样地的土壤含水量高于未经过修剪样地的土壤含水量，对降雨的响应更加敏感，强降雨事件后，回缩修剪样地和未修剪样地的土壤含水量差异更加明显。这一现象表明，回缩修剪可能通过减小冠层覆盖使得更多的降雨到达地表，从而增加了表层土壤水分的输入量。

2.4 不同因素对板栗林降雨再分配的影响

从图 6 中可以看出，穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量和林冠截留率与包括平均冠幅、平均冠幅面积、平均树高在内的林分特征无显著相关关系，但穿透雨率、树干茎流率与平均冠幅、平均冠幅面积、平均树高有显著关系 ($p < 0.01$)。板栗林穿透雨量、穿透雨率、树干茎流量、树干茎流率和林冠截留量与降雨量均有显著的正相关关系 ($p < 0.01$)，而林冠截留

率与降雨量呈现显著的负相关关系 ($p < 0.01$)。林地表层土壤含水量与降雨量有显著的正相关关系 ($p < 0.01$)，与平均冠幅、平均冠幅面积和平均树高等林分特征指标有显著的负相关关系 ($p < 0.01$)。即降雨是驱动板栗林地表层土壤水分变化的关键因素，回缩修剪通过改变板栗林冠层结构，导致经过回缩修剪的板栗林地降雨后土壤含水量高于未修剪的板栗林地，间接调控林地表层土壤水分的输入。

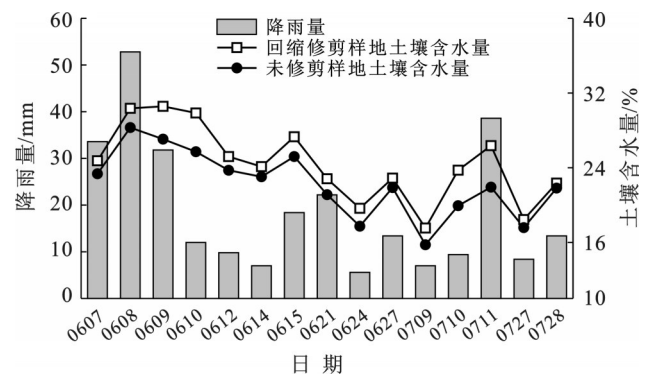
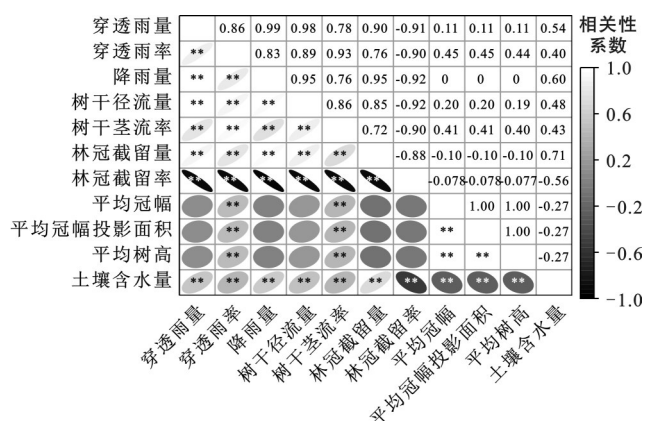


图 5 板栗林地表层土壤含水量特征

Fig.5 Characteristics of surface soil water content in *C. mollissima* forests



注:*,**分别表示在0.05和0.01水平显著相关。

图6 板栗林降雨再分配与降雨量和板栗林特征的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of rainfall redistribution with precipitation and *C. mollissima* forest characteristics

穿透雨量(P_{TF})、树干茎流量(P_{SF})、冠层截留量(P_I)与降雨量(P)分别符合如下相关关系:

$$P_{TF} = 0.783P - 3.601, R^2 = 0.976 \quad (7)$$

$$P_{SF} = 0.072P - 0.374, R^2 = 0.908 \quad (8)$$

$$P_I = 0.188P + 4.056, R^2 = 0.902 \quad (9)$$

线性回归方程表明,板栗林穿透雨量、树干茎流量、冠层截留量均随降雨量增加而增加($p < 0.01$),产生穿透雨的降雨量阈值为4.60 mm,产生树干茎流的降雨量阈值为5.19 mm。方程(7)和(8)中常数项为负数,表明当降雨量小于临界阈值时,植被冠层截留降雨占降雨分配的主要部分,此时降雨全部被冠层截留,不产生林下穿透雨和树干茎流。但当降雨量超过阈值时,冠层截留能力达到饱和,降雨便穿过冠层形成穿透雨和树干茎流。

3 讨论

3.1 板栗林降雨再分配与林外降雨的关系

本研究量化了板栗林地降雨再分配过程,明确了穿透雨、树干茎流和冠层截留对林外降雨量的响应规律。研究表明观测样地板栗林下穿透雨量(率)和树干茎流量(率)均随林外降雨量的增加而增加,穿透雨量和树干茎流量均与降雨量呈线性增加关系,穿透雨率和树干茎流率均与林外降雨量呈对数函数增长并趋于稳定。在降雨初期,植被冠层截留尚未饱和,大气降雨首先被林地冠层枝叶截留吸收,因此穿透雨率较低,随着降雨量的增大林冠截留容量不断减少,冠层枝叶截留雨水逐渐饱和,此时降雨便直接透过林地冠层后向地表滴落,穿透雨随降雨量的增加而增加^[17-18]。与万艳芳等^[19]的研究不同,青海云杉穿透雨率、树干茎流率及冠层截留率趋于稳

定的降雨量为15 mm,而板栗林穿透雨率和冠层截留率趋于稳定的降雨量为30 mm,出现这种差异的原因可能是树种特性、林分结构等因素的综合效应,板栗树是一种阔叶树种,叶片扁平宽大,持水能力比针叶树种强。

除此之外,板栗林的冠层结构、枝叶空间分布和导流能力不同于青海云杉也会致使林分达到截留饱和的降雨量不同。板栗林冠层截留量随降雨量的增加呈线性增加趋势,这一结论与曹泽涛^[20]在黄土高原刺槐人工林的研究有所不同,刺槐林的冠层截留量与降雨量之间呈现指数增加关系,即先快速增加,后增速变缓,最终趋于稳定。出现这一差异可能是由于刺槐林和板栗林在叶面积指数、郁闭度和冠层结构复杂性之间存在差异。板栗林冠层截留率与林外降雨量之间呈负相关关系,随着降雨量的增大,林冠截留率减小并逐步趋近于稳定。当降雨量较小时,冠层截留在降雨再分配过程中起主要作用,随着降雨量的增加,冠层截留量逐渐达到饱和,更多的降雨会快速转化为穿透雨和树干茎流^[21]。降雨特征对林地降雨再分配有显著影响,但随着降雨条件和气候因素的变动可能减弱穿透雨特征和冠层之间的相关关系^[22]。

3.2 回缩修剪对板栗林地降雨再分配和地表土壤含水量的影响

本研究揭示了回缩修剪处理对板栗林降雨再分配过程及林下表层土壤水分含量的影响。赵明等^[23]通过研究毛乌素沙地沙柳的冠层对降雨再分配的影响,发现沙柳的穿透雨率与冠幅呈负相关,主要是由于随着树龄的增加,树枝趋于水平,冠层垂直投影面积增加。本研究表明经过回缩修剪的板栗林地的穿透雨量和穿透雨率均小于未修剪的板栗林地,这一结果表明板栗林经营活动的干扰通过改变冠层结构进而影响降雨再分配的过程。这一结果的出现可能是由于回缩修剪改变了冠层结构及其持水能力。经过回缩修剪后的板栗新枝生长旺盛且叶片密集集中于修剪处,导致短时间内冠层单位投影面积的叶片数量增加,从而增强冠层对降雨的拦截和吸收能力。除此之外,未经修剪的板栗林树高较高、枝条较为舒展,形成了较大的冠层空隙,使得部分降雨直接穿过冠层空隙形成穿透雨,而经过回缩修剪的板栗冠层结构更加紧密,能够更好地拦蓄部分降雨。

每次降雨结束后板栗林地土壤含水量与同期降雨量有关,降雨量大的降雨结束后土壤含水量也较高。在同一降雨条件下,回缩修剪样地的土壤含水量普遍高于未经修剪样地的土壤含水量,可能是由于经过回缩修剪减小了冠层覆盖度,更多的降雨直接滴

落到地面,从而导致林地表层土壤含水量增大。

3.3 板栗林地降雨再分配的影响因素

降雨再分配过程受到气象要素与冠层结构的双重调控,降雨特征对林地降雨再分配具有显著的影响,树干茎流和穿透雨随降雨强度和风速的变化而变化。本研究通过相关性分析探究了板栗林地降雨再分配的主要影响因素。研究表明,板栗林地的穿透雨、树干茎流和冠层截留均与降雨量有明显的正相关关系,这与张瑞^[24]在黄土陵区苹果园和张勇波等^[25]在西双版纳橡胶林降雨再分配研究中的发现一致,进一步印证了降雨特征对经济林降雨再分配过程的显著影响。除降雨量之外,降雨强度、降雨历时也是影响林地降雨再分配特征的关键降雨特征因子^[26]。降雨强度高时,雨滴动能较大,能够突破冠层快速滴落到地面,从而增加林地的穿透雨量。长历时低强度降雨过程中,降雨在林地冠层表面有更长的时间蒸发,冠层截留率更高。风速作为影响冠层降雨再分配的重要气象因子,能够通过改变枝叶倾角和雨滴滴落的轨迹,从而影响林下穿透雨的空间分布。

与许多明确林分冠层结构对降雨再分配影响的研究不同,板栗林的冠幅对穿透雨、树干茎流和冠层截留的影响不明显。这一发现并非对冠层结构重要性的否定,可能是由于冠层结构对降雨再分配的影响具有复杂性。植被冠层对降雨再分配各部分的影响十分复杂,其中,植物高度、林分密度、植被基径、树干表皮粗糙度、叶面积指数、胸径等均是影响降水再分配的主要林分结构因素^[27-28]。有研究表明,在相似的降雨条件下,随着杉木林树龄的增加,其林冠截留量呈增加趋势^[29]。植被结构特征是导致林内降雨再分配出现差异的重要因素,林分结构发生改变时,林分的郁闭度、冠层间隙和枝叶重叠程度等空间结构特征也会发生改变,从而影响降雨再分配过程^[30],本研究发现回缩修剪的板栗林地穿透雨、树干茎流与林冠截留均与未修剪的板栗林地存在差异,就是因为回缩修剪导致板栗冠幅空间结构发生了变化,从而导致降雨分配过程出现了差异。本研究与目前一些研究存在差异,可能是由于板栗林经人工修剪冠层结构特征相对均匀,只用冠幅不能说明林分结构对林地降雨再分配的影响,未来研究应引入更完整的冠层结构参数并结合完整的气象观测,以更科学地说明林地降雨再分配特征。

4 结论

(1) 板栗林降雨再分配特征与降雨量显著相关。

林下穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量均与林外降雨量呈线性正相关,穿透雨率和树干茎流率均与林外降雨量呈对数函数增加趋势,土壤含水量与降雨量也呈正相关关系。

(2) 回缩修剪对板栗林冠层结构的改变影响着林地降雨再分配特征。回缩修剪的板栗林地的穿透雨和树干茎流均小于未修剪的板栗林地,同一降雨条件下,回缩修剪样地的土壤含水量普遍高于未修剪样地的土壤含水量。

(3) 板栗林冠层结构复杂,常规冠幅指标对降雨再分配特征的解释能力有限,穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量和林冠截留率与冠幅和树高无显著相关关系,林冠截留率与降雨量呈现显著的负相关关系。土壤含水量与降雨量呈显著的正相关关系,与冠幅和树高呈显著的负相关关系。

未来研究中需要引入更加完整的气象因子和林分结构特征因子,进一步深入研究各类要素对林地降雨再分配的影响,为后续开展多因素耦合机制研究奠定基础,为板栗林生产与生态功能协调持续发展提供科学指导。

参考文献(References)

- [1] Magliano P N, Whitworth-Hulse J I, Baldi G. Interception, throughfall and stemflow partition in drylands: Global synthesis and Meta-analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 638-645.
- [2] 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.
- [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] 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 Lingling, Kang Fengfeng, Han Hairong, 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.
- [5] 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(16/17):2903-2920.
- [6] Magliano P N, Whitworth-Hulse J I, Florio E L, et al. Interception loss, throughfall and stemflow by *Larrea divaricata*: The role of rainfall characteristics and plant morphological attributes [J]. Ecological Research, 2019, 34(6):753-764.
- [7] 张钧尧, 韩青池, 阿拉腾苏和, 等. 基于人工降雨灌木纯林及柳湾林降雨再分配差异[J]. 干旱区研究, 2025, 42(3):489-498.
- Zhang Junyao, Han Qingchi, A L, et al. Differences in rainfall redistribution between pure shrub forests and willow bay based on artificial rainfall [J]. Arid Zone Research, 2025, 42(3):489-498.
- [8] Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe [J]. Journal of Hydrology, 2007, 335(1/2):37-54.
- [9] Linhoss A C, Siegert C M. A comparison of five forest interception models using global sensitivity and uncertainty analysis [J]. Journal of Hydrology, 2016, 538:109-116.
- [10] 王爱娟, 章文波. 林冠截留降雨研究综述[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4):55-59.
- Wang Aijuan, Zhang Wenbo. Reviews of vegetation interception of rainfall [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(4):55-59.
- [11] 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.
- [12] Zhang Wanjun, Scholten T, Seitz S, et al. Rainfall redistribution in subtropical Chinese forests changes over 22 years [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28(16):3837-3854.
- [13] Ma Changkun, Luo Yi, Shao Mingan, et al. Estimation and testing of linkages between forest structure and rainfall interception characteristics of a *Robinia pseudoacacia* plantation on China's Loess Plateau [J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(2):529-542.
- [14] 李振新, 郑华, 欧阳志云, 等. 岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征[J]. 生态学报, 2004, 24(5):1015-1021.
- Li Zhenxin, Zheng Hua, Ouyang Zhiyun, et al. The spatial distribution characteristics of throughfall under *Abies faxoniana* forest in the Wolong Nature Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5):1015-1021.
- [15] 王卫卫, 张应良. 退耕还林农户技术禀赋对经果林换种的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(5):215-222.
- Wang Weiwei, Zhang Yingliang. The impact of farmers' technical endowment on the adopting new varieties of fruit forest [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(5):215-222.
- [16] 余远国, 章承林, 白涛, 等. 修剪对板栗生长与结果的影响[J]. 经济林研究, 2013, 31(1):156-160.
- She Yuanguo, Zhang Chenglin, Bai Tao, et al. Effects of pruning on growth and fruiting in *Castanea mollissima* [J]. Nonwood Forest Research, 2013, 31(1):156-160.
- [17] Deng Jifeng, Yu Yafan, Shao Jie, et al. Rainfall interception using the revised Gash analytical model for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in a semi-humid region of NE China [J]. Ecological Indicators, 2022, 143:109399.
- [18] 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.
- [19] 万艳芳, 刘贤德, 王顺利, 等. 祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5):224-229.
- Wan Yanfang, Liu Xiande, Wang Shunli, et al. Rainfall canopy partitioning and its influencing factors of *Picea crassifolia* forest in the Qianlian Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5):224-229.
- [20] 曹泽涛. 黄土高原刺槐人工林疏伐强度对降雨再分配、枯落物持水及土壤水分动态的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
- Cao Zetao. Effects of thinning intensity of *Robinia pseudoacacia* plantation on rainfall redistribution, litter water retention and soil water dynamics in the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.
- [21] 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 Wen Yue, 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.
- [22] 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 Xiangfu. Study on rainfall redistribution process in dif-

- ferent forests in Three Gorges reservoir area [D]. Wuhan, Hubei: Central China Normal University, 2019.
- [23] 赵明,王文科,赵永华,等.毛乌素沙地沙柳对水分的再分配过程及其影响机制[J].生态学报,2025,45(15):7550-7563.
- Zhao Ming, Wang Wenke, Zhao Yonghua, et al. Study on water redistribution process and mechanism of *Salix psammophila* in Mu Us sandy land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(15):7550-7563.
- [24] 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].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
- Zhang Rui. Precipitation redistribution and evapotranspiration of cropland and orchard on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [25] 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 Yongbo, Xie Jiang, Chen Guoyun, et al. Characteristics of rainfall redistribution of rubber plantations at different ages in Xishuangbanna [J]. Journal of Tropical Biology, 2022,13(1):57-63.
- [26] 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.
- [27] Zhang Yafeng, Wang Xinping, Pan Yanxia, et al. Global quantitative synthesis of effects of biotic and abiotic factors on stemflow production in woody ecosystems [J]. Global Ecology and Biogeography, 2021,30(8):1713-1723.
- [28] Zhang Yafeng, Yuan Chuan, Chen Ning, et al. Rainfall partitioning by vegetation in China: A quantitative synthesis [J]. Journal of Hydrology, 2023,617:128946.
- [29] 伍倩,闫文德,赵亮生,等.湖南会同杉木人工林林冠截留特征[J].生态学报,2016,36(13):4131-4140.
- Wu Qian, Yan Wende, Zhao Liangsheng, et al. Canopy interception characteristics of Chinese fir plantations in central south China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(13):4131-4140.
- [30] 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.

(上接第 84 页)

- [25] 刘艳萍,刘铁军,蒙仲举.草原区植被对土壤风蚀影响的风洞模拟试验研究[J].中国沙漠,2013,33(3):668-672.
- Liu Yanping, Liu Tiejun, Meng Zhongju. Wind tunnel simulation test on the influence factors of wind erosion in grassland areas [J]. Journal of Desert Research, 2013,33(3):668-672.
- [26] 余沛东,陈银萍,李玉强,等.植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J].中国沙漠,2019,39(5):29-36.
- Yu Peidong, Chen Yinping, Li Yuqiang, et al. Influence of vegetation coverage on sand flow structure and wind erosion yield with wind tunnel experiment as a case [J]. Journal of Desert Research, 2019,39(5):29-36.
- [27] 张春来,宋长青,王振亭,等.土壤风蚀过程研究回顾与展望[J].地球科学进展,2018,33(1):27-41.
- Zhang Chunlai, Song Changqing, Wang Zhengting, et al. Review and prospect of the study on soil wind erosion process [J]. Advances in Earth Science, 2018,33(1):27-41.
- [28] 刘湘杰,党晓宏,汪季,等.生物基可降解聚乳酸沙障的蚀积特征[J].水土保持通报,2019,39(5):113-119.
- Liu Xiangjie, Dang Xiaohong, Wang Ji, et al. Characteristics of erosion and deposition of biodegradable polylactic acid checkerboard barriers [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(5):113-119.
- [29] Wang Tao, Qu Jianjun, Niu Qinghe. Comparative study of the shelter efficacy of straw checkerboard barriers and rocky checkerboard barriers in a wind tunnel [J]. Aeolian Research, 2020,43:100575.
- [30] 周娜,张春来,田金鹭,等.半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征[J].地理研究,2014,33(11):2145-2156.
- Zhou Na, Zhang Chunlai, Tian Jinlu, et al. Flow field controlling the concave surface of the semi-buried checkerboards and its characterization by grain sizes of sediments [J]. Geographical Research, 2014,33(11):2145-2156.