

DOI: 10.20103/j.stxb.202307041438

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.

Deng Y L, Zhao X Y, Cui Z J, Feng Y J, Zhang W Q, Liu X D. Canopy rainfall interception characteristics of forest ecosystems in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2981-2992.

中国森林生态系统林冠层降雨截留特征

邓雅丽¹, 赵新宇¹, 崔自杰¹, 冯英杰¹, 张卫强², 刘效东^{1,*}

¹ 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

² 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广州 510520

摘要: 森林生态系统作为陆地生态系统的主体, 其发达的林冠层通过调节降水量、改变降水强度等深刻影响着流域全过程水文通量及水分输出。以中国广泛开展的典型森林降雨再分配过程的年尺度监测数据为基础, 揭示中国不同类型森林生态系统的降雨再分配及林冠层降雨截留特征, 阐明森林生态系统林冠层截留特征与降雨、植被要素的关系。结果表明: 我国不同森林生态系统年穿透雨量处于 141.4—2450.0 mm 之间, 年穿透雨率为 36.3%—92.3%。5 种典型森林生态系统多年平均穿透雨量 ((445.3±252.9)—(1230.6±479.6) mm) 占同期多年平均降雨量的 (72.6±9.2)%—(77.4±8.9)%。不同森林生态系统年树干茎流量介于 0—508.2 mm 之间, 占同期年降雨量的 0—25.8%。5 种典型森林生态系统树干茎流量多年平均值 ((9.8±17.3)—(87.8±81.6) mm) 占同期多年平均降雨量的 (1.4±1.9)%—(5.4±4.6)%。不同森林生态系统林冠层年降雨截留范围在 25.7—812.9 mm 之间, 占年降雨量的 4.2%—55.6%。5 种典型森林生态系统多年平均林冠截留量 ((154.2±81.6)—(392.2±203.5) mm) 占同期年平均降雨量的 (18.7±7.4)%—(25.9±8.3)%。进一步分析表明, 我国森林生态系统穿透雨量、树干茎流量和林冠层截留量随观测区年降雨量的增加而呈显著增大 ($P<0.05$), 年穿透雨率、年树干茎流量随年降雨量的增加呈显著线性上升趋势 ($P<0.05$), 而年林冠截留率与年降雨量呈显著的负相关关系 ($P<0.01$), 降雨量、叶面积指数是深刻影响森林生态系统林冠层降雨截留率等特征的重要因素。整体上, 不同类型森林生态系统林冠截留降雨能力存在明显差异, 林冠层截留率突出表现为: 落叶林大于常绿林、针叶林大于阔叶林。

关键词: 森林类型; 冠层截留; 穿透雨; 水源涵养; 服务功能

Canopy rainfall interception characteristics of forest ecosystems in China

DENG Yali¹, ZHAO Xinyu¹, CUI Zijie¹, FENG Yingjie¹, ZHANG Weiqiang², LIU Xiaodong^{1,*}

¹ College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

² Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

Abstract: Forest ecosystem is the main body of the terrestrial ecosystem. The well-developed canopy of forest ecosystem profoundly influences the hydrological flux and water output in the whole process of watershed by regulating precipitation amount and changing precipitation intensity. Based on the annual-scale monitoring data of forest rainfall redistribution processes (i.e., throughfall, stemflow, canopy rainfall interception) widely carried out in different forest ecosystems in China during 1983—2022, this paper reveals the rainfall redistribution and canopy rainfall interception characteristics of typical forest ecosystems in China, and elucidates the relationship between forest canopy rainfall interception characteristics and precipitation (i.e., rainfall amount) and vegetation structural variables (i.e., mean height, mean diameter at breast height, leaf area index). The results showed that the annual throughfall of different forest ecosystems in China ranged from

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (2023A1515030123); 广东省普通高校省级重大科研项目 (2022KTSCX016); 广州市科技计划项目 (202201010640); 广东省林业科技创新项目 (2021KJCX003)

收稿日期: 2023-07-04; **网络出版日期:** 2024-01-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxd@scau.edu.cn

限于数据的可获取性, 本研究尚未统计到中国港澳台地区数据。

141.4 to 2450.0 mm, with throughfall rates of 36.3%—92.3%. The average multi-year throughfall of five typical forest ecosystems ((445.3±252.9)—(1230.6±479.6) mm) accounted for (72.6±9.2)%—(77.4±8.9)% of the annual mean rainfall. The annual stemflow of the different forest ecosystems ranged from 0 to 508.2 mm, accounting for 0% to 25.8% of the annual mean rainfall during the same period. The multi-year average stemflow in the five typical forest ecosystems ((9.8±17.3)—(87.8±81.6) mm) accounted for (1.4±1.9)%—(5.4±4.6)% of the annual mean rainfall. Canopy rainfall interception in different forest ecosystems ranged between 25.7 to 812.9 mm, representing 4.2%—55.6% of annual rainfall in the different forest ecosystems. The multi-year average canopy rainfall interception of five typical forest ecosystems ((154.2±81.6)—(392.2±203.5) mm) accounted for (18.7±7.4)% to (25.9±8.3)% of the annual mean rainfall during the same period. Further analysis showed that the amount of throughfall, stemflow, and canopy rainfall interception showed a significant increase ($P<0.05$) with the increase of annual rainfall in the corresponding observation region, respectively. In contrast, the annual throughfall rate and annual stemflow rate of different forest ecosystems in China showed an increasing trend with the increase of annual rainfall ($P<0.05$), while the annual canopy interception rate showed a significantly negative correlation with annual rainfall ($P<0.01$). Rainfall amount and leaf area index were demonstrated to be the main factors deeply influencing canopy redistribution characteristics (including canopy rainfall interception) in forest ecosystems at an annual scale. On the whole, the regulation ability of canopy rainfall interception was obviously different among typical forest ecosystems in China, the canopy interception rate was obviously characterized by deciduous forests being larger than evergreen forests, and coniferous forests being larger than broad-leaved forests.

Key Words: forest type; canopy interception; throughfall; water conservation; service function

森林生态系统是生物圈生态系统中结构最复杂、分布最广、类型最丰富的陆地生态系统,具有极其重要的涵养水源、保持水土、稳定气候等生态系统服务功能^[1-2]。对陆地森林生态系统而言,林冠层是其与外界环境相互作用、彼此反馈的第一界面层,具有显著的遮荫、截留降水、抑制土壤蒸发等水热调节效应,深刻影响着生态系统的水分输入、下渗、存蓄及产流输出等的量及过程^[3-5],进而对森林生态系统的生产力、生态服务功能的形成等发挥重要作用。因此,一直以来,森林生态系统林冠层的水文效应受到全世界的广泛关注^[6-7]。

大气降雨进入森林生态系统时,森林冠层首先对其进行截留并将降雨重新分配为林冠截留、穿透雨、树干茎流 3 个组分,使大气降水在数量、时间和空间上发生变化,并进一步减缓地表径流,有效的涵养了水源^[8-9]。近几十年来,我国针对不同气候区典型森林类型的冠层截留特征及其水文效应开展了较为系统地监测。闫俊华等^[10]对南亚热带顶级生态系统季风常绿阔叶林进行了长达 7 年的观测,指出季风常绿阔叶林冠层降雨截留率高达 31.8%,高于历史时期该林分冠层截留率的报道结果。孙天妙等^[11]通过对六盘山 8 种不同植被类型林冠层截留特征的对比监测,揭示了在该地区白蜡林相对其它森林类型较高的降雨截留能力。胡珊珊等^[12]总结了国内外针对林冠层截留过程中水分变化特征的大量研究表明:大气降水通过林冠层后,穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量占降水总量的比分别处于 60%—90%、0.5%—14%和 10%—40%。这些研究对丰富我国主要森林生态系统水文过程、功能及服务价值的认识起到了重要作用。然而,长期以来,由于研究站点数量、观测方法及周期长短等问题的限制,使得宏观、全面认知与评估我国主要森林生态系统林冠层降雨截留特征及其功能效益等问题尚存在一定的局限性。

森林生态系统的林冠层对大气降雨的截留是一个复杂的过程,它受降雨自身特性(降雨总量、降雨强度、降雨持续时间以及降雨间隔期等)、林分特征(林分密度、物种组成以及林龄等)、林冠特征(郁闭度、叶面积指数、冠层厚度、枝叶形态等)和区域气候因子(气温、湿度、风速等)等诸多因素的综合影响^[13-15],不同地区、不同气候条件和不同森林类型,森林冠层对降水的截留能力有很大的差异。Zhang 等^[6]通过比较不同森林类型的林冠降雨截留特征表明林冠截留能力:混交林>灌木>针叶林>阔叶林。周佳宁等^[16]对不同地区同种森林类型的林冠截留特征的研究指出其因降雨条件、气候因子的差别而存在明显差异。我国幅员辽阔,地形、气

候、植被类型等多种多样,阐明不同类型森林生态系统的林冠层降水截留功能与特征,对于评估我国陆地生态系统的水文生态服务效益及其价值具有重要意义。

随着学科的发展、观测标准与规范统一,尤其是随着国家生态系统观测研究网络(National Ecosystem Research Network of China, CNERN)和中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)等的宏观布局,有关中国典型森林生态系统水分要素的观测受到了前所未有的重视。为此,本研究通过整合国内、外已发表文献资料、数据,系统性呈现中国典型森林生态系统林冠层对大气降雨的再分配特征及其影响要素,以期为我国森林植被生态水文功能评价、水源涵养林建设与经营以及林—水协同管理等理论与实践问题提供重要支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

中国地域广袤、自然条件复杂,气候与地形多样化造就了丰富的森林生态系统类型,且整体呈现出明显的地带性特征。我国第九次森林资源清查结果显示:我国森林总面积 2.31 亿 hm^2 ,森林覆盖率达到 24.02%^[17]。从北到南,依次大致发育着寒温带和温带山地针叶林、温带针阔混交林、温带落叶阔叶林、亚热带针阔混交林、亚热带常绿阔叶林、热带雨林和季雨林^[18]。基于特定研究目的和空间数据的可得性^[19],依据《中华人民共和国植被图(1:100 万)》植被分类方法^[20],结合全国生态系统类型图^[21-22],本研究所梳理森林生态系统类型如表 1。

表 1 中国典型森林生态系统分类

Table 1 Classification of typical forest ecosystems in China

森林生态系统类型 Forest ecosystem type		代表树种 Representative species
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	寒温带和温带山地针叶林 温带针叶林	兴安落叶松、华北落叶松等 油松、华山松等
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	亚热带和热带山地针叶林 亚热带和热带针叶林	杉木、侧柏等 湿地松、马尾松等
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaf forest	温带落叶阔叶林 亚热带落叶阔叶林	蒙古栎、白桦、麻栎等 杜仲、枫香等
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaf forest	亚热带常绿阔叶林 热带雨林、季雨林 亚热带、热带竹林和竹丛	栲树、木荷、樟树 热带山地雨林 毛竹、麻竹等
针阔混交林 Mixed broad-leaf forest	温带针阔混交林 亚热带针阔混交林	红松—紫椴、红松—白桦混交等 马尾松—石栎、竹—杉混交等

1.2 数据的收集与筛选

本研究所涉及中国典型森林生态系统大气降雨量、穿透雨量、树干茎流量等数据以及研究区地理位置、气候因子、森林群落结构因子包括林分平均树高、胸径、叶面积指数(Leaf area index, LAI)等参数均来自于 CNKI 与 Web of Science 公开发表的文献和出版的专著。为了充分、有效地利用所收集的数据,更好地反映各森林生态系统类型冠层截留与降雨特征和植被要素的关系,本研究根据样本数据获得方法的统一性对文献资料进行筛选,同时为保证数据质量,本研究剔除了非年尺度研究等不符合要求的降水再分配数据,最终得到 174 篇相关论文(时间跨度为 1983—2022 年)。对筛选后的论文进行降水再分配数据收集工作,多年数据采用平均值,未提供具体数值的文献则利用 GetData Graph Digitizer 2.25 进行数字化和提取数据。此外,由于所收集落叶针叶林生态系统年降雨集中于生长季,冬、春季极少降雨,因此本研究从文献收集的落叶针叶林降水及其再分配过程数据长度多为生长季。最终,筛选后获得 297 组数据,其中落叶针叶林 39 组、常绿针叶林 89 组、落叶阔叶林 43 组、常绿阔叶林 109 组、针阔混交林 17 组。通过研究地点的经纬度坐标绘制了中国典型森林生

态系统的区位分布图(图1)。这些监测点相对全面地涵盖了我国森林生态系统的分布区域,能够代表我国典型的森林生态系统类型。

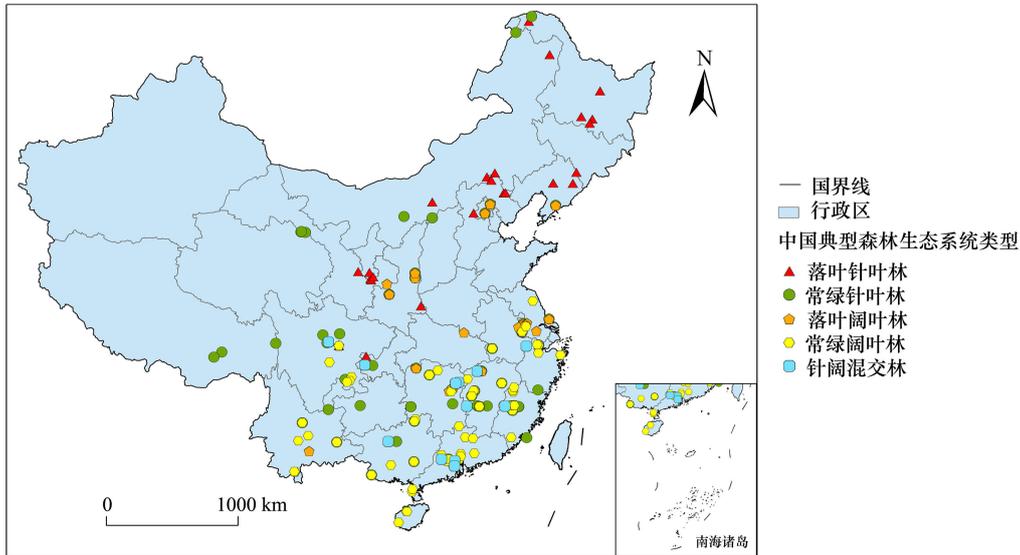


图1 中国典型森林生态系统分布图

Fig.1 Distribution map of typical forest ecosystems in China

1.3 研究方法

根据冠层水量平衡原理,计算各森林生态系统林冠层降雨截留量。计算公式如下:

$$I = P - SF - TF \quad (1)$$

林冠层降雨截留率能够反映森林生态系统林冠层对雨水的拦截能力。林冠截留率计算公式如下:

$$W_I = I/P \quad (2)$$

穿透雨率计算公式如下:

$$W_{TF} = TF/P \quad (3)$$

树干茎流率计算公式如下:

$$W_{SF} = SF/P \quad (4)$$

式中, I 为林冠截留量(mm), P 为林外降雨量(mm), TF 为穿透雨量(mm), SF 为树干茎流量(mm), W_I 为林冠截留率(%), W_{TF} 为穿透雨率(%), W_{SF} 为树干茎流率(%)。

1.4 数据分析

本文将所收集得数据利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 24.0 软件进行处理,对所得指标求取平均值、标准差,同时采用 Pearson 相关分析探究降雨再分配因子的影响要素,并基于拟合结果(回归系数 R^2) 确定最优拟合方程,建立各森林生态系统类型林冠层截留量与降雨量以及降雨再分配比率与降雨量、树高、胸径、LAI 之间的关系。数据制图采用 Origin 2022 进行。

2 结果与分析

2.1 中国典型森林生态系统降雨截留再分配特征

本研究中,所观测森林生态系统年降雨量处于 236.6—2911.0 mm 之间,基本涵盖了我国主要森林生态系统的分布区域。5 种典型森林生态系统多年平均降雨量波动于 (613.0 ± 321.5) — (1656.3 ± 544.8) mm,常绿阔叶林观测区域多年平均降雨量显著高于其他森林生态系统类型。如图 2 所示,我国不同森林生态系统的年穿透雨量(141.4—2450.0 mm)占年降雨量比值的 36.3%—92.3%;从多年平均值来看,5 种典型森林生态系统穿

透雨量处于(445.3±252.9)—(1230.6±479.6) mm 之间,穿透雨率在(72.6±9.2)%—(77.4±8.9)%之间;常绿阔叶林穿透雨量显著高于其他森林生态系统(1230.6±479.6 mm),落叶针叶林穿透雨量在各森林生态系统类型中最低(445.3±252.9 mm);针阔混交林穿透雨量仅次于常绿阔叶林(1122.2±278.8 mm),落叶阔叶林与常绿针叶林穿透雨量接近,分别为(862.3±436.1) mm 和(948.4±460.6) mm。从穿透雨率来看,落叶阔叶林多年平均值(77.4±8.9)%在 5 种典型森林生态系统中最高,落叶针叶林多年平均值最低(72.6±9.2)%。

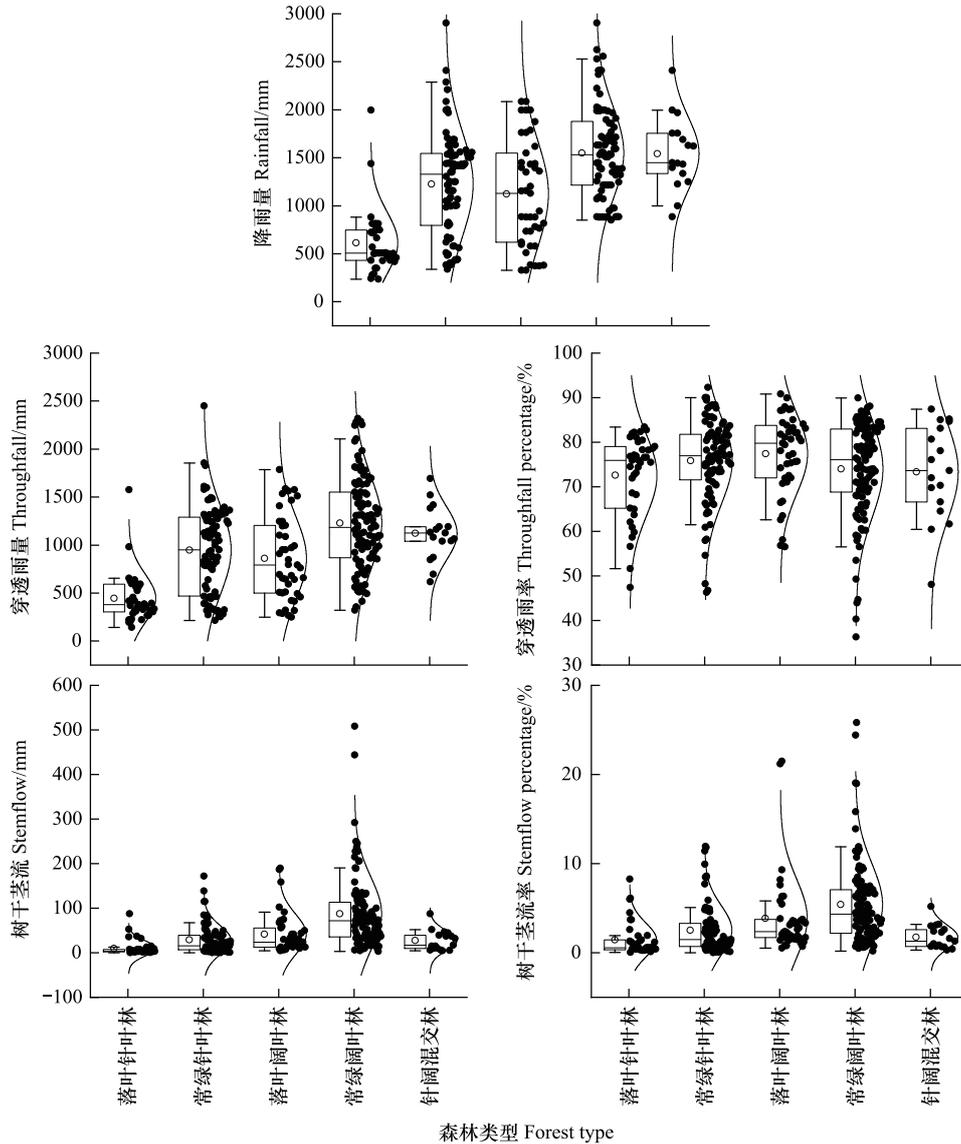


图 2 中国森林生态系统降雨量、穿透雨量、穿透雨率及树干茎流量与树干茎流率

Fig.2 Rainfall, throughfall, throughfall percentage and stemflow and stemflow percentage in forest ecosystems in China

由图 2 可知,所观测各森林生态系统的树干茎流量、树干茎流率年际变化分别处于 0—508.2 mm 与 0—25.8%之间;从多年平均值看,5 种典型森林生态系统树干茎流量介于(9.8±17.3)—(87.8±81.6) mm 之间,占多年平均降雨量的(1.4±1.9)%—(5.4±4.6)%,其中,常绿阔叶林树干茎流量、树干茎流率分别为(87.8±81.6) mm 和(5.4±4.6)%,均在各典型森林生态系统中最高。落叶阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林三者多年平均树干茎流量相差不大,介于(27.3±22.6)—(41.4±45.3) mm 之间,占同期多年平均降雨量的(1.8±1.3)%—(3.9±4.4)%。落叶针叶林多年树干茎流量与多年树干茎流率平均值在各森林生态系统中均为最低,年均树干茎流量仅(9.8±17.3) mm,占同期年降雨总量的(1.4±1.9)%。

如图 3 所示,中国森林生态系统的林冠层大气降雨截留量年际变化介于 25.7—812.9 mm 之间,占同期年降雨量的 4.2%—55.6%。从多年平均值来看,5 种典型森林生态系统类型林冠截留量在 (154.2 ± 81.6) — (392.2 ± 203.5) mm,林冠截留率变动于 $(18.7 \pm 7.4)\%$ — $(25.9 \pm 8.3)\%$;其中,针阔混交林((392.2 ± 203.5) mm)与常绿阔叶林((322.0 ± 158.4) mm)的林冠层降雨截留量显著高于其他森林生态系统类型,针阔混交林、常绿阔叶林林冠截留率分别为 $(24.9 \pm 11.1)\%$ 、 $(20.6 \pm 10.3)\%$ 。常绿针叶林及落叶阔叶林多年平均林冠截留量分别达到了 (251.4 ± 139.7) mm 和 (218.6 ± 146.6) mm,常绿针叶林多年平均林冠截留率为 $(21.8 \pm 9.1)\%$,而落叶阔叶林多年平均林冠截留率仅 $(18.7 \pm 7.4)\%$,在 5 种典型森林生态系统中最低。落叶针叶林多年平均林冠截留量显著低于其他森林生态系统,仅 (154.2 ± 81.6) mm,但其多年平均林冠截留率在 5 种典型森林生态系统中最高,达到了 $(25.9 \pm 8.3)\%$ 。

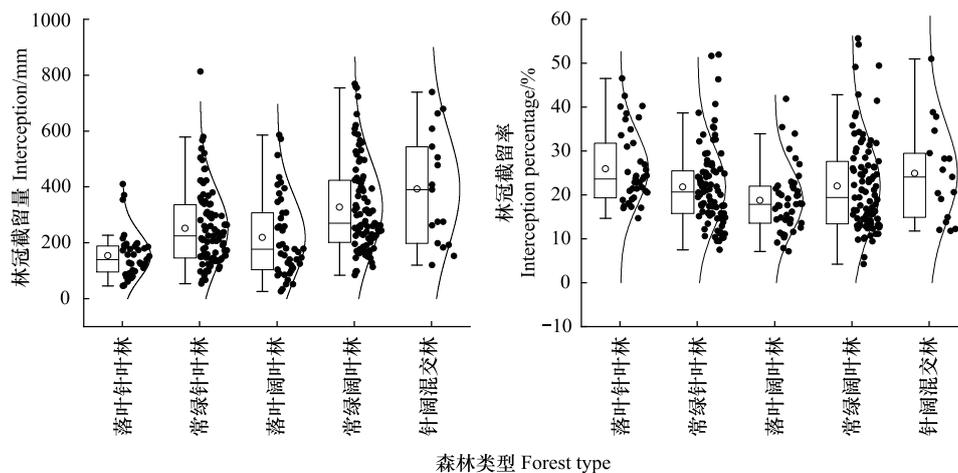


图 3 中国森林生态系统林冠截留量与林冠截留率

Fig.3 Canopy interception and canopy interception percentage in forest ecosystems in China

2.2 森林生态系统降雨再分配特征的影响因素

整体上,中国森林生态系统年穿透雨量、年树干茎流量与年降雨量呈极显著线性正相关关系 ($P < 0.01$),年林冠截留量随年降雨量的增大呈对数函数式增加 ($P < 0.01$) (图 4)。如图 4 所示,5 种典型森林生态系统年穿透雨量与年降雨量回归方程的决定系数 (R^2) 介于 0.71—0.95 之间;从不同类型森林生态系统年树干茎流量与年降雨量的相关性看,落叶针叶林二者相关关系最好。由此可见,区域大气降雨量对穿透雨量、树干茎流量的大小具有的关键性作用。5 种典型森林生态系统年林冠截留量与年降雨量之间均呈显著的正相关关系 ($P < 0.01$),不同类型森林生态系统二者间决定系数 (R^2) 介于 0.13—0.64 之间 (图 4)。在相对低的年降水量区间内,不同类型森林生态系统年林冠降雨截留量均随年降雨总量的增大而显著增大,而在高年降水量的研究区域,林冠截留量随降雨量增加的趋势减缓。

森林生态系统降雨再分配比率受气候条件和植被特征的影响。随年降雨量的增加,森林生态系统年穿透雨率、树干茎流率均呈显著增大,而年林冠截留率呈显著幂函数式下降 ($P < 0.01$) (图 5)。如图 5 所示,随林分平均胸径的增大,森林年林冠截留率呈显著上升趋势 ($P < 0.05$),而年穿透雨率显著下降 ($P < 0.05$),树干茎流率与平均胸径之间没有达到显著水平;年林冠截留率随林分平均树高的增加显著增大 ($P < 0.05$),年树干茎流率整体随树高的上升而显著下降 ($P < 0.05$),年穿透雨率与平均树高之间的相关性没有达到显著水平但整体呈下降趋势;此外,年穿透雨率随森林冠层叶面积指数的增加而呈幂函数式降低 ($P < 0.05$),树干茎流率随森林冠层叶面积指数的增加呈现不显著上升趋势 ($P > 0.05$),林冠层年降雨截留率随森林叶面积指数的升高呈现显著的幂函数式上升 ($P < 0.05$)。综合分析结果表明,对中国森林生态系统而言,年降雨量、平均胸径、平均树高、LAI 对林冠层降雨截留特征均有显著影响。

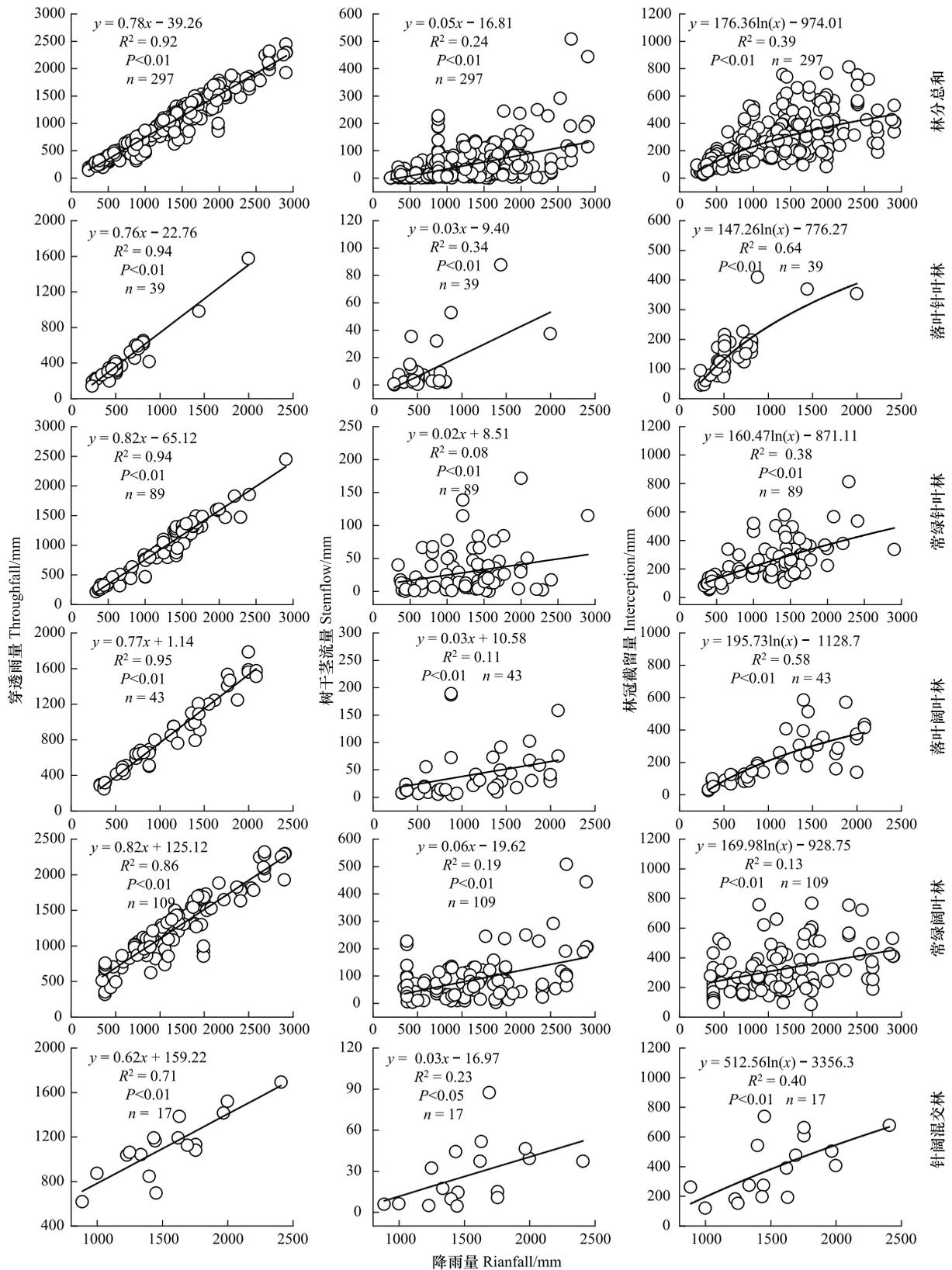


图 4 中国森林生态系统年穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量与年降雨量的关系

Fig.4 Relationship between annual throughfall, stemflow, canopy interception and annual rainfall in forest ecosystems in China

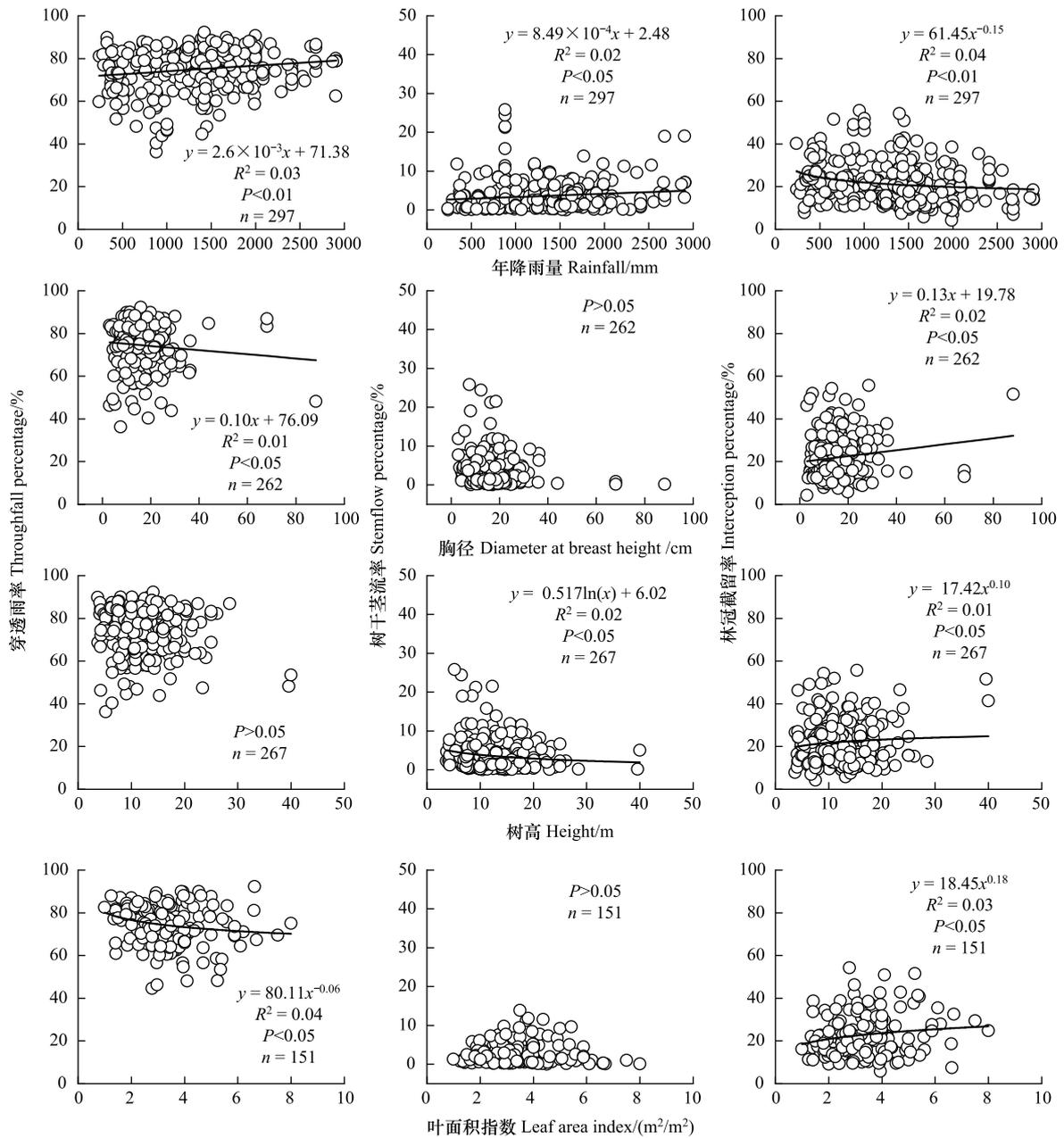


图5 中国森林生态系统年穿透雨率、树干茎流率、林冠截留率与年降雨量、平均胸径、平均树高、叶面积指数的关系

Fig.5 Relationships of annual throughfall percentage, stemflow percentage, and canopy interception percentage with annual rainfall, mean diameter at breast height, mean tree height, and leaf area index in forest ecosystems in China, respectively

3 讨论

3.1 中国典型森林生态系统降雨再分配特征

森林作为陆地生态系统的主体,林冠层是森林生态系统对大气降雨发挥调节作用的起点。大气降雨在通过森林冠层后其时空格局发生了剧烈变化,并赋予了森林生态系统涵养水源、净化水质等功能与效益^[23-24]。整体上,中国森林生态系统年穿透雨率处于 36.3%—92.3%。从 5 种典型森林生态系统类型来看,多年平均穿透雨率变化范围在 (72.6±9.2)%—(77.4±8.9)% 之间,高于世界上温带和北方森林的穿透雨所占比值 (62.3%—70.6%)^[25]。本研究表明,年平均穿透雨率最高的是落叶阔叶林 (77.4±8.9)%,与 Mahendrappa 等^[26]对落叶阔

叶林开展的长达 13 年的相关监测结果(77.0%—83.0%)相近;年穿透雨率(56.6%—90.8%)与 Llorens 等^[27]对地中海地区落叶阔叶林(58.5%—94.4%)的报道结果接近,且亚热带落叶阔叶林年穿透雨率的变幅稍大于温带落叶阔叶林。常绿阔叶林多年平均穿透雨率(74.0±10.8)%仅次于落叶阔叶林,年穿透雨率浮动范围(36.3%—89.9%)与地中海气候下同一森林生态系统类型(55.2%—89.4%)的报道结果相近^[27]。落叶针叶林多年平均穿透雨率(72.6±9.2)%在 5 种森林生态系统类型中最小,低于美国落叶松林多年平均穿透雨率(81.0%)^[26],主要是与分布地域、降雨特征、对象树种的差异等因素有关。

在森林降雨再分配的过程中,树干茎流所占比例较小,一般在 0—5%^[28],因而常被认为是水文循环中可以忽略不计的组成部分^[29—30]。然而,也有研究表明树干茎流率可高达 5%甚至 10%以上^[3,31—32]。此外,树干茎流还为林木根部及周围供给了大量养分,对森林生态系统的水养循环起着不可替代的作用^[33]。本研究中,5 种典型森林生态系统类型多年平均树干茎流量介于(9.8±17.3)—(87.8±81.6) mm 之间,占多年平均降雨量的(1.4±1.9)%—(5.4±4.6)%,该结果处于以往相关研究报道结果的范围内^[34—35]。其中,树干茎流率多年平均值最高的是常绿阔叶林(5.4±4.6)%,其年树干茎流率变幅(0—25.8%)高于 Su 等^[36]对国外亚热带常绿阔叶林年树干茎流率(0.3%—12.5%)的研究结果,这可能是与本研究部分观测站点其林分特征、枝叶特性及降雨特性有关。而落叶阔叶林多年平均树干茎流率(3.9±4.4)%略低于常绿阔叶林,其年际变化(0.5%—21.5%)与地中海气候下落叶阔叶林树干茎流率(0.2%—20.4%)的研究结果接近^[27],但远高于 Price 等^[37]对美国加拿大落叶阔叶林(3.0%—6.0%)的研究结果。这主要与研究区域及其气候特征有关,本研究中落叶阔叶林在中温带、暖温带、亚热带均有分布,使得我国落叶阔叶林年树干茎流率的变幅较大。落叶针叶林多年平均树干茎流率在各森林生态系统中最小(1.4±1.9)%,年树干茎流率变动在 0.1%—8.3%,这主要与落叶针叶林物候特征、树冠及树皮特性等有关。

中国 5 种典型森林生态系统多年平均林冠截留量((154.2±81.6)—(392.2±203.5) mm)、林冠截留率((18.7±7.4)%—(25.9±8.3)%)均在我国主要森林生态系统的相关研究报道范围内^[38—39]。本研究中,多年平均林冠截留率最高的森林类型是落叶针叶林((25.9±8.3)%),这与陈健果等^[40]对我国季风气候下针叶林((24.1±10.2)%)的研究结果接近,常绿针叶林林冠截留率((21.8±9.1)%)与 Miralles 等^[41]利用卫星遥感对全球针叶林林冠截留率(22.0%)的估测结果相近。落叶针叶林、常绿针叶林年林冠层截留率分别变动在 14.7%—46.5%、7.5%—51.9%,与以往关于我国南北不同气候带针叶林(14.5%—50.0%)^[42]以及国外温带针叶林(9.0%—48.0%)^[43]林冠截留率的报道一致。落叶阔叶林多年平均林冠截留率((18.7±7.4)%)在 5 种生态系统类型中最低,这与利用卫星遥感估测的全球尺度落叶阔叶林截留率(19.0%)^[41]结果相近;从年林冠截留率(7.1%—41.9%)来看,与以往国外学者对温带落叶阔叶林林冠截留率(11.0%—36.0%)的研究报道结果接近^[43]。

3.2 中国典型森林生态系统降雨截留的影响因素

森林生态系统降雨截留再分配受降雨量、降雨强度、持续时间等降雨特征及气候条件和林分特征(树高、胸径、LAI 等)的综合影响^[44—45],不同森林生态系统降雨再分配及其截留特征存在显著差异。本研究所观测森林生态系统年穿透雨量均随区域年降雨量的增加而显著增大,这与在中国各主要温度带的研究结果相似^[46—48]。受不同气候区降雨特征的影响,常绿阔叶林多年平均穿透雨量在各森林生态系统类型中最高,针阔混交林次之,落叶针叶林最小;其中,福建武夷山自然保护区境内常绿阔叶林年穿透雨量高达 2320.0 mm^[49],江西省中亚热带湿润季风气候区常绿针叶林年穿透雨量达 2450.0 mm^[50],年穿透雨量均为其相应森林生态系统类型中最高。不同森林生态系统类型穿透雨率较穿透雨量呈现出不同的规律,落叶阔叶林多年平均穿透雨率高于其他森林生态系统,可能是与本研究落叶阔叶林分布地域降雨特征有关,此外群落结构、冠层物理及物候特征也造就了其较高的穿透雨率^[51—52]。5 种典型森林生态系统类型中落叶针叶林多年平均穿透雨率最小,这可能是由于所收集落叶针叶林降雨再分配的监测数据主要源于生长季,且针叶截留能力较强^[53—54],加之该研究区域年降雨量低,低总量、长历时降水格局有利于林冠层的截留蒸发并导致穿透雨率相对较

低^[55-56]。此外,也有研究表明冠层结构特征是影响穿透雨的重要因素^[57-58],这进一步支持了本研究得出的森林生态系统年穿透雨率随 LAI 的增加呈显著下降趋势的研究结果。

本研究中,常绿阔叶林多年平均树干茎流率在各类型森林生态系统中最高,落叶阔叶林树干茎流率仅次于常绿阔叶林。其中,位于福建省武夷山、江西省鹰潭市的常绿阔叶林年树干茎流量显著高于其他地区同类型以及其他类型森林生态系统,分别达到 508.2 mm^[49]和 444.0 mm^[50],这与两地常绿阔叶林区观测期间年降雨量较高,且群落结构复杂、郁闭度高等有关。一般认为叶革质、分支角小、冠层厚、郁闭度高的森林树干茎流率大^[59-60],本研究中落叶针叶林年树干茎流率在 5 种典型森林生态系统中最低。以华北落叶松为主的落叶针叶林其锥形树冠结构与近乎水平的分支角度使雨水不易到达主干,树皮粗糙、吸附雨水能力强,不易产生树干茎流。以往研究表明,树干茎流不仅受降雨特征的影响,还与树高、胸径等林分特征、LAI 等林冠特征、枝叶特性等多种因素有关^[59,61]。此外,树干寄附生植物等也能通过影响冠层截留而间接作用于树干茎流^[62-63]。本研究结果表明,树干茎流量、树干茎流率均与降水量显著相关,树高因子亦显著影响树干茎流率,而林分平均胸径、LAI 与年树干茎流率之间相关性未达到显著水平,这可能与不同区域森林类型、树种特性及降雨特性的耦合、交织作用影响有关^[45,62,64]。

中国森林生态系统年林冠截留量随年降雨量的增加呈显著上升趋势($P < 0.01$),年林冠截留量在相对低的年降水量区间内随年降雨总量的增大而显著增大,在高年降水量的研究区域,林冠截留量随降雨量增加的趋势减缓。此外,中国森林生态系统年林冠层截留率与树高、胸径、LAI 等林分特征呈显著正相关关系。其中,LAI 作为综合反映群落冠层结构特征的重要参数,相对于其他林分特征因子,其对林冠层截留率的影响更为明显^[65-66]。这与林冠层对降雨截留的生态学机制有关,大气降雨到达森林生态系统时首先被复杂的林冠层截留,冠层厚、郁闭度高、结构复杂的森林类型其 LAI 相对较高导致林冠截留率相应较高^[67-68]。但当林冠超过其最大截留能力时,LAI 则不再发挥主导作用,此时降雨量、雨强、历时等持续发挥其作用^[3,65]。Yang 等^[69]研究也指出降雨量、降雨强度等降雨特征是影响林冠截留率主要因素,本研究中林冠截留量最大值(812.9 mm^[70])与林冠截留率(55.6%^[71])最大值分别出现在亚热带气候区的常绿针叶林和常绿阔叶林。5 种森林生态系统类型中,落叶针叶林具有最大的林冠截留率,落叶阔叶林林冠截留率最低,如前所述这主要与落叶针叶林区域观测期内相对低的降雨量((613.0 ± 321.5) mm)及其格局特征以及落叶阔叶林群落与冠层结构、物候特征等的深刻影响有关。

4 结论

本文以中国典型森林生态系统降雨再分配过程的文献数据为基础,探究中国森林生态系统的降雨再分配、林冠层降雨截留特征及其与降雨、植被要素的关系。我国不同森林生态系统年穿透雨量、树干茎流量和冠层截留量变化范围分别为 141.4—2450.0 mm、0—508.2 mm 和 25.7—812.9 mm,分别占年降雨总量的 36.3%—92.3%、0—25.8%和 4.2%—55.6%。从多年平均值来看,5 种典型森林生态系统穿透雨量、树干茎流量和冠层截留量分别变动在 (445.3 ± 252.9) — (1230.6 ± 479.6) mm、 (9.8 ± 17.3) — (87.8 ± 81.6) mm 和 (154.2 ± 81.6) — (392.2 ± 203.5) mm,分别占同期降雨量的 $(72.6 \pm 9.2)\%$ — $(77.4 \pm 8.9)\%$ 、 $(1.4 \pm 1.9)\%$ — $(5.4 \pm 4.6)\%$ 和 $(18.7 \pm 7.4)\%$ — $(25.9 \pm 8.3)\%$;其中,常绿阔叶林多年平均穿透雨量、树干茎流量均最高,多年平均冠层截留量仅次于针阔混交林,落叶针叶林均最低,但落叶针叶林冠层截留率在 5 种森林生态系统类型中最高。整体上,我国不同类型森林生态系统林冠降雨截留调节能力存在差异,林冠层截留率突出表现为:落叶林大于常绿林、针叶林大于阔叶林。此外,不同类型森林生态系统年穿透雨量、树干茎流量和林冠层截留量均随观测区年降雨量的增加而呈显著增大。年穿透雨率、年树干茎流率随年降雨量的增加呈显著上升趋势,而年林冠截留率与年降雨量呈显著的负相关关系。除气候要素降雨量因子外,林分结构因子如胸径、树高与 LAI 深刻影响森林生态系统冠层降雨截留率的高低。

参考文献 (References):

- [1] Miura S, Amacher M, Hofer T, San-Miguel-Ayaz J, Thackway R. Protective functions and ecosystem services of global forests in the past quarter-century. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 35-46.
- [2] Zhai J J, Wang L, Liu Y, Wang C Y, Mao X G. Assessing the effects of China's Three-North Shelter Forest Program over 40 years. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159354.
- [3] 田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 彭守璋, 彭焕华. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素. *生态学报*, 2012, 32(4): 62-72.
- [4] 余秋伍, 杨菁, 沈国春. 浙江天童常绿阔叶林林冠结构与群落物种组成的关系. *植物生态学报*, 2022, 46(5): 529-538.
- [5] 伍倩, 闫文德, 赵亮生, 邓湘雯, 宁晨, 项文化. 湖南会同杉木人工林林冠截留特征. *生态学报*, 2016, 36(13): 4131-4140.
- [6] Zhang Q F, Lv X Z, Yu X X, Ni Y X, Ma L, Liu Z Q. Species and spatial differences in vegetation rainfall interception capacity: a synthesis and meta-analysis in China. *Catena*, 2022, 213: 106223.
- [7] Cano-Arboleda L V, Villegas J C, Restrepo A C, Quintero-Vallejo E. Complementary effects of tree species on canopy rainfall partitioning: New insights for ecological restoration in Andean ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2022, 507: 119969.
- [8] Zhao Z M, Wu F Z, Peng Y, Wu Q Q, Heděnc P, An N N, Yue K. Changes in rainfall pH after passing through the forest canopy: Increase in throughfall but decrease in stemflow. *Journal of Hydrology*, 2023, 624: 129955.
- [9] 刘效东, 张卫强, 冯英杰, 赵新宇, 甘先华, 周庆. 森林生态系统水源涵养功能研究进展与展望. *生态学杂志*, 2022, 41(4): 784-791.
- [10] 闫俊华, 周国逸, 张德强, 王旭. 鼎湖山顶级森林生态系统水文要素时空规律. *生态学报*, 2003, 23(11): 2359-2366.
- [11] 孙天妙, 阳辉, 曹建生. 太行山区不同植被降雨再分配特征. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(9): 1471-1481.
- [12] 胡珊珊, 于静洁, 胡望, 金明. 华北石质山区油松林对降水再分配过程的影响. *生态学报*, 2010, 30(7): 1751-1757.
- [13] Zhao S C, Zheng X J, Yin L H, Wang Y G. Forest stand factors determine the rainfall pattern of crown allocation of *Picea schrenkiana* in the northern slope of Mount Bogda, Tianshan Range, China. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13: 1113354.
- [14] Van Stan J T II, Siegert C M, Levia D F Jr, Scheick C E. Effects of wind-driven rainfall on stemflow generation between codominant tree species with differing crown characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(9): 1277-1286.
- [15] Yu Y, Zhu J J, Gao T, Liu L F, Yu F Y, Zhang J X, Wei X H. Evaluating the influential variables on rainfall interception at different rainfall amount levels in temperate forests. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128572.
- [16] 周佳宁, 王彬, 王云琦, 刘春霞, 吕超, 杜文姬, 马良. 三峡库区典型森林植被对降雨再分配的影响. *中国水土保持科学*, 2014, 12(4): 28-36.
- [17] 全国绿化委员会办公室. 2020年中国国土绿化状况公报(摘要). *国土绿化*, 2021(3): 4-9.
- [18] 应俊生, 陈梦玲. *中国植物地理*. 上海: 上海科学技术出版社, 2011: 145-167.
- [19] 龚诗涵, 肖洋, 方瑜, 郑华, 肖赓, 欧阳志云. 中国森林生态系统地表径流调节特征. *生态学报*, 2016, 36(22): 7472-7478.
- [20] 中国科学院中国植被图编辑委员会编制. *中华人民共和国植被图*. 北京市: 地质出版社, 2007.
- [21] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 张磊, 李晓松, 曾源, 包安明. 21世纪前十年的中国土地覆盖变化. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 723-731.
- [22] Du J, Shi C X, Zhang C D. Modeling and analysis of effects of precipitation and vegetation coverage on runoff and sediment yield in Jinsha River Basin. *Water Science and Engineering*, 2013, 6(1): 44-58.
- [23] Fathizadeh O, Hosseini S M, Zimmermann A, Keim R F, Boloorani A D. Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands. *Science of the Total Environment*, 2017, 601-602: 1824-1837.
- [24] Tonello K C, Rosa A G, Pereira L C, Matus G N, Guandique M E G, Navarrete A A. Rainfall partitioning in the Cerrado and its influence on net rainfall nutrient fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 108372.
- [25] Barbier S, Balandier P, Gosselin F. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: a review. *Annals of Forest Science*, 2009, 66(6): 1-11.
- [26] Mahendrapa M K. Partitioning of rainwater and chemicals into throughfall and stemflow in different forest stands. *Forest Ecology and Management*, 1990, 30(1-4): 65-72.
- [27] 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.
- [28] 鲍文, 包维楷, 何丙辉, 丁德蓉. 森林生态系统对降水的分配与拦截效应. *山地学报*, 2004, 22(4): 483-491.
- [29] Howard M, Hathaway J M, Tirpak R A, Lisenbee W A, Sims S. Quantifying urban tree canopy interception in the southeastern United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 77: 127741.
- [30] Grunicke S, Queck R, Bernhofer C. Long-term investigation of forest canopy rainfall interception for a spruce stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 292/293: 108125.
- [31] Gomez-Peralta D, Oberbauer S F, McClain M E, Philippi T E. Rainfall and cloud-water interception in tropical montane forests in the eastern Andes of Central Peru. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 1315-1325.
- [32] 张一平, 王馨, 王玉杰, 刘文杰, 刘玉洪. 西双版纳地区热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究. *生态学报*, 2003, 23(12): 2653-2665.
- [33] Niu X T, Fan J, Xing Y Z. Stemflow temporal dynamics differ significantly between standing live and dead branches of two xerophytic shrub species. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 130053.
- [34] 方江平, 项文化, 刘韶辉. 西藏原始林芝云杉林雨季林冠降水分配特征. *生态学报*, 2010, 30(14): 3679-3687.
- [35] 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(16/17): 2903-2920.

- [36] Su L, Xu W T, Zhao C M, Xie Z Q, Ju H. Inter- and intra-specific variation in stemflow for evergreen species and deciduous tree species in a subtropical forest. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 1-9.
- [37] Price A G, Carlyle-Moses D E. Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 119(1/2): 69-85.
- [38] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 49-54.
- [39] 温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析. *林业科学*, 1995, 31(4): 289-298.
- [40] 陈健果, 方秦华, 胡宏友. 季风气候下林冠降雨初次分配特征及其主效驱动因子分析. *福建林业科技*, 2013, 40(4): 35-40.
- [41] Miralles D, Gash J, H Holmes T, de Jeu R M, Dolman. Global canopy interception from satellite observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(16): D16122.
- [42] 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林冠截留过程研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [43] Hörmann G, Branding A, Clemen T, Herbst M, Hinrichs A, Thamm F. Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in Northern Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 79(3): 131-148.
- [44] Nooraei Beidokhti A, Moore T L. The effects of precipitation, tree phenology, leaf area index, and bark characteristics on throughfall rates by urban trees: A meta-data analysis. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 60: 127052.
- [45] 韩春, 陈宁, 孙杉, 赵长明. 森林生态系统水文调节功能及机制研究进展. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2191-2199.
- [46] 石磊, 盛后财, 满秀玲, 蔡体久. 兴安落叶松林降雨再分配及其穿透雨的空间异质性. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(2): 90-96.
- [47] 孙忠林, 王传宽, 王兴昌, 张全智. 两种温带落叶阔叶林降雨再分配格局及其影响因子. *生态学报*, 2014, 34(14): 3978-3986.
- [48] 张勇波, 谢江, 陈国云, 田耀华, 周会平. 西双版纳不同树龄橡胶林对降雨的再分配特征. *热带生物学报*, 2022, 13(1): 57-63.
- [49] 李凌浩, 林鹏, 王其兵, 贺金生, 何建源, 刘初钿, 金昌善, 陈仁华. 武夷山不同林龄甜槠林水文学效应的比较研究. *应用生态学报*, 1998, 9(1): 18-22.
- [50] 张文猛, 王兴祥. 亚热带马尾松和木荷人工林降雨再分配及其化学特征. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(9): 80-86.
- [51] 高瑶瑶, 王兵, 宋庆丰. 江西大岗山常绿阔叶林的降水再分配. *温带林业研究*, 2018, 1(2): 20-25.
- [52] Yue K, De Frenne P, Fornara D A, Van Meerbeek K, Li W, Peng X, Ni X Y, Peng Y, Wu F Z, Yang Y S, Peñuelas J. Global patterns and drivers of rainfall partitioning by trees and shrubs. *Global Change Biology*, 2021, 27(14): 3350-3357.
- [53] Zhao L S, Hou R, Fang Q. Differences in interception storage capacities of undecomposed broad-leaf and needle-leaf litter under simulated rainfall conditions. *Forest Ecology and Management*, 2019, 446: 135-142.
- [54] Francis J R, Wuddivira M N, Farrick K K. Exotic tropical pine forest impacts on rainfall interception: Canopy, understory, and litter. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127765.
- [55] Siegert C M, Levia D F. Seasonal and meteorological effects on differential stemflow funneling ratios for two deciduous tree species. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 446-454.
- [56] Raz-Yaseef N, Yakir D, Schiller G, Cohen S. Dynamics of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 77-85.
- [57] 盛后财, 蔡体久, 俞正祥. 大兴安岭北部兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林下穿透雨空间分布特征. *生态学报*, 2016, 36(19): 6266-6273.
- [58] 晁阳, 于松平, 刘泽彬, 马鑫, 郭建斌, 王彦辉. 六盘山半湿润区华北落叶松林内降雨的空间异质性及合理取样数. *林业科学研究*, 2023, 36(4): 20-30.
- [59] 徐丽娜, 梁启, 张言, 李天庚, 隋海新, 白巍, 王赛一. 吉林省中部蒙古栎林降雨截留再分配特征. *温带林业研究*, 2022, 5(1): 36-40, 47.
- [60] Yan T, Wang Z H, Liao C G, Xu W Y, Wan L. Effects of the morphological characteristics of plants on rainfall interception and kinetic energy. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125807.
- [61] Su L, Qi L Y, Zhuang W L, Zhang Y J. Contrasting effects of low-severity fire on stemflow production between coexisting pine and oak trees. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159885.
- [62] Zabret K, Šraj M. How characteristics of a rainfall event and the meteorological conditions determine the development of stemflow: A case study of a birch tree. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2021, 4: 663100.
- [63] Van Stan J T, Pypker T G. A review and evaluation of forest canopy epiphyte roles in the partitioning and chemical alteration of precipitation. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 813-824.
- [64] 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.
- [65] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 熊伟, 于澎涛, 郭浩. 六盘山华山松(*Pinus armandii*)林降雨再分配及其空间变异特征. *生态学报*, 2009, 29(1): 76-85.
- [66] Gough C M, Atkins J W, Fahey R T, Hardiman B S, LaRue E A. Community and structural constraints on the complexity of eastern North American forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(12): 2107-2118.
- [67] Livesley S J, Baudinette B, Glover D. Rainfall interception and stem flow by eucalypt street trees-The impacts of canopy density and bark type. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(1): 192-197.
- [68] 董玲玲, 康峰峰, 韩海荣, 程小琴, 赵金龙, 宋小帅. 辽河源 3 种林分降雨再分配特征及其影响因素. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 145-150.
- [69] Yang B, Lee D K, Heo H K, Biging G. The effects of tree characteristics on rainfall interception in urban areas. *Landscape and Ecological Engineering*, 2019, 15(3): 289-296.
- [70] 邓湘雯. 不同年龄阶段会同杉木林水文学过程定位研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.
- [71] 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.