

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230343

伏牛山三种天然林的树干茎流季节 差异及胸径影响

牛保亮¹, 刘彦春^{2*}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 河南大学生命科学学院, 河南 开封 475004)

摘要: [目的] 探讨伏牛山三种森林类型的树干茎流差异及与林木胸径的关系, 分析相同量级降雨的树干茎流季节差异。[方法] 在伏牛山宝天曼地区选择三种典型天然林(华山松针叶林、锐齿栎阔叶林、华山松-鹅耳枥针阔混交林)的标准木, 实测并收集树干茎流量后分析比较。[结果] 生长季内的高降雨量事件(58.2 mm)导致的树干茎流体积与林木胸径呈正相关, 然而在低降雨量事件(10.8 mm)下二者呈负相关。在单次降雨量相同或相近条件下, 冬季的树干茎流体积(17 770~35 590 mL)和茎流率(0.106)显著高于春、夏和秋季, 而树干茎流体积在前三个季节之间并无显著差异, 针阔混交林在秋季和冬季的茎流率更高, 这主要归因于冬季落叶阔叶树的林冠叶片截持作用消失。相比针叶林和阔叶林, 针阔混交林的林分密度更高且胸径更小, 导致其林分树干茎流量最高。[结论] 不同森林类型的树干茎流量因降雨量和林木胸径大小而异, 林木胸径和叶片形态是决定树干茎流季节差异的重要因素。

关键词: 树干茎流; 伏牛山; 胸径; 季节变异

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)03-0169-06

水循环是维系陆地生态系统功能及维持人类生产生活的重要生态过程。作为陆地生态系统面积最大的植物群落, 森林在调节水循环方面发挥着重要作用^[1]。森林植被对降雨的截留及再分配是水循环的重要环节。林内穿透雨、林冠截留及树干茎流是森林参与降雨再分配的3种主要形式^[2-3]。相比林冠截留和穿透雨, 全球森林平均树干茎流量通常小于降雨总量的10%^[4], 在降雨再分配的量级上并不占优势。然而, 树干茎流汇集的水可沿树干流至根系区域^[5-6], 一方面可以改变林地土壤水分空间分布格局^[1, 5]; 另一方面伴随着叶片及枝干表面矿质元素的淋洗, 树干茎流中的元素含量高出大气降水几倍, 是植物生长及土壤生物生命活动的重要保障^[7-8]。因此, 树干茎流在森林生态系统水及养分

循环中的作用不容忽视。树干茎流形成过程和变化规律受到国内外学者广泛关注, 在茎流量、水溶性元素含量及其影响因素等方面开展大量研究^[2, 9-11]。但是, 不同天然林类型树干茎流对同一量级降雨的响应是否存在季节差异目前尚不明晰。

伏牛山是秦岭山脉向东延伸至河南地区的余脉, 呈西北-东南走向, 跨越近400公里, 是中国黄河、淮河和长江三大水系的分水岭, 同时也是我国南水北调中线工程渠首-丹江口水库的水源涵养区^[10]。伏牛山地区植物种类繁多, 森林资源丰富, 是河南省植物多样性的分布和发育中心。类型多样且结构复杂的森林植被成为区域水量调节和水质改善的重要因素。本研究以伏牛山南麓的宝天曼

收稿日期: 2023-09-05 修回日期: 2023-10-17

基金项目: 河南省科技厅科技攻关项目(222102320437); 国家自然科学基金(31971454); 河南省青年骨干教师培养计划(2020);

作者简介: 牛保亮, 助理研究员。研究方向: 森林生态学。Email: cafbao liang@163.com

* 通讯作者: 刘彦春, 副教授。研究方向: 森林生态学。Email: yanchunliu@henu.edu.cn

自然保护区为例,分析该区域主要天然林的树干茎流规律,旨在揭示不同森林类型的树干茎流季节差异,阐明树干胸径与树干茎流量的关系,为评价伏牛山森林资源的水源涵养功能提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

河南宝天曼森林生态系统国家野外科学观测研究站(简称宝天曼站)(33°25'~33°33' N, 111°53'~112°01' E)位于河南省内乡县内。内乡地处北亚热带向暖温带的过渡区,以亚热带季风气候为主。该地年均气温 15.1 °C, 年均降水量 885.6 mm, 年均相对湿度 68%。依据宝天曼站的自动气象站数据,生态站所在位置(海拔 1 270 m)的年均气温 9.8 °C, 年均降水量 1 011.2 mm, 相对湿度 72.7%。该地区的代表性植被群落为不同的栎类天然林,优势树种是锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acutiserrata* Maximowicz ex Wenzig)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume)和短柄枹(*Quercus serrata* Murray),其它伴生树种包括华山松(*Pinus armandi* Franch.)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii* Hance)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum* (Stokes) F. A. Barkl.)和化香(*Platycarya strobilacea* Sieb. et Zucc.)等。本研究野外调查时间为 2015 年,期间宝天曼站年均

气温 10.6 °C, 年降水量为 901.2 mm, 生长季 5—9 月份降水量占 62% (图 1)。

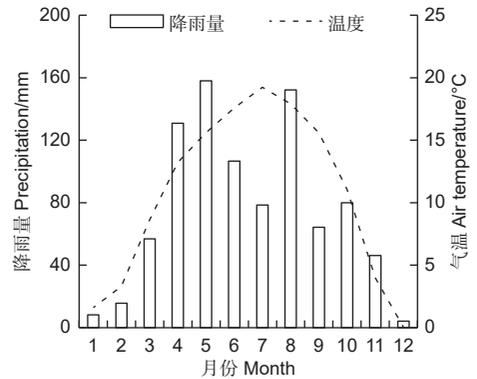


图 1 观测年的逐月气温和降水量

Fig. 1 Average air temperature and total rainfall during the experiment

1.2 样地布置

在宝天曼站区域内选择华山松针叶林、锐齿栎阔叶林、以华山松和鹅耳枥为主的针阔混交林作为研究林分,每个森林类型设立 3 个 20 m × 20 m 样地,样地间隔在 500 m 以上。首先对每个样地初步调查,确定林分胸径分布结构。调查显示针叶林、阔叶林、针阔混交林的平均密度为 1 400.1、1 575.2、2 325.5 株 hm⁻²;针叶林的平均胸径和树高最高;针阔混交林的平均胸径和树高最低,但密度最高(表 1)。

表 1 3 种天然林林分基本特征

Table 1 Stand basic characteristic of the three natural forest types

森林类型 Forest types	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	密度/(株·hm ⁻²) Density	郁闭度 Canopy
针叶林 Coniferous forest(CF)	17.1 ± 3.9	9.09 ± 3.4	1 400.1 ± 37.4	0.89 ± 0.11
针阔混交林 Mixed coniferous and broadleaf forest(MF)	11.8 ± 2.8	8.55 ± 2.1	2 325.5 ± 42.8	0.97 ± 0.13
阔叶林 Broadleaf forest(BF)	15.7 ± 3.6	8.74 ± 1.8	1 575.3 ± 32.4	0.61 ± 0.09

在每个样地内,按胸径大小分布将树木分为 4 个径级,每个径级选择 2 株标准木。在每株标准木的树干约 1.3 m 高处,用内径 2.5 cm、长约 150 cm 的聚氯乙烯胶管螺旋状环绕树干 1 周,将管子的末端连接到密封的水桶内。每次降雨结束后,用量桶测定水桶内收集的雨水体积,即为每株林木的茎流体积/mL。林分水平的树干茎流量(Stemflow, SF)/mm 用下列公式计算^[12]:

$$SF = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times M_i}{S_p \times 10\ 000} \quad (1)$$

式中, n 代表径级数, C_i 和 M_i 代表第 i 径级的树干茎流水量体积/mL 和林木株数, S_p 代表样地面积 (400 m²)。

1.3 数据分析

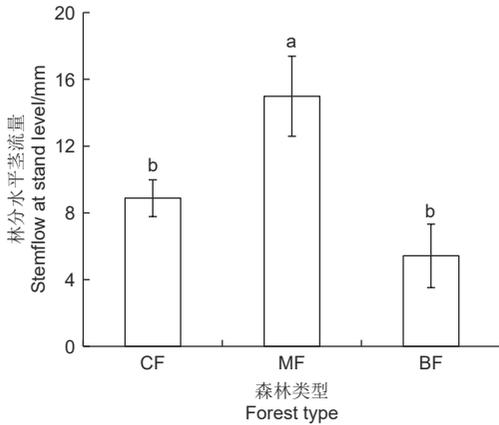
采用单因素方差分析检验森林类型之间的林分树干茎流量差异,并采用对数回归模型分析林分树干茎流量与大气降雨量的关系。选择生长季中期两次不同量级的降雨事件(7月 30 日降雨 10.8 mm, 9月 11 日降雨 58.2 mm),分析不同量级降雨下树干茎流量与林木胸径的关系。此外,进一步

选择降雨量接近的4次降雨事件(5月12日9.4 mm、7月27日9.6 mm、9月25日10.1 mm和11月21日9.6 mm),比较相同降雨量下的林分树干茎流体积的季节(月份)差异,采用单因素方差分析比较森林类型之间的林木茎流体积差异。运用简单线性回归分析,研究11月份9.6 mm降雨后不同林型树干茎流与胸径的关系(5月、7月和9月回归关系均不显著,故未展示)。

2 分析与结果

2.1 不同森林类型林分树干茎流差异

该研究监测自5月开始至11月结束,涵盖研究区森林的整个生长季。数据分析显示,针阔混交林的林分树干茎流量最高,为14.99 mm,显著高于针叶林(8.89 mm)和阔叶林(5.43 mm)($p < 0.05$,图2),比二者分别高出68.7%和176.0%。然而,针叶林与阔叶林并无显著差异($p > 0.05$,图2)。



注: 标记不同小写字母表示在0.05水平下达到显著差异

Note: Bars labeled with different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 levels

图2 3种天然林的林分树干茎流量对比

Fig. 2 Comparison of the stemflow at stand level for three natural forest types

2.2 林分树干茎流量与降水量和林木胸径的关系

分析发现,观测期间内不同森林类型的林分树干茎流量均与次降水量呈显著的对数关系($p < 0.05$,图3)。树干茎流量随降水量增加而逐渐上升,但上升速率逐渐变小。在不同降雨量级下,针阔混交林的林分树干茎流量最高,而针叶林与阔叶林的树干茎流量较接近。随着降雨量增加,针叶林和阔叶林更早趋于树干茎流量的平稳状态,而针阔

混交林更晚达到树干茎流的平稳状态且量级更高(图3)。

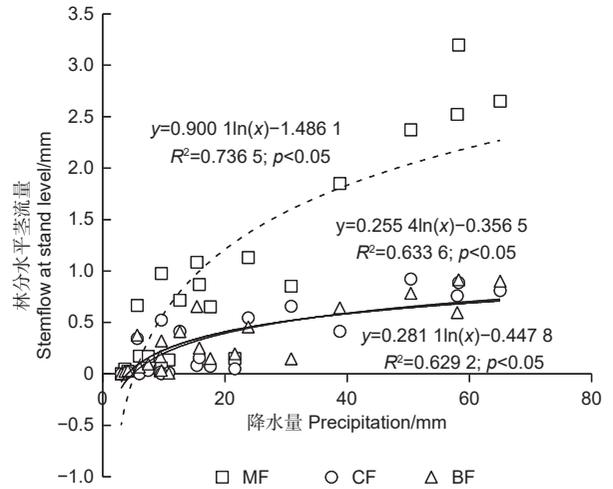


图3 不同森林类型林分树干茎流量与次降雨量的关系
Fig. 3 Relationships between stemflow at stand level and precipitation of individual rainfall events for different forest types

选取降雨量差别较大的两次降雨事件,分析不同量级降雨时单株林木茎流体积与胸径的关系。结果表明,在58.2 mm次降雨事件中,3种森林类型的树干茎流体积均与林木胸径呈正相关(图4),针叶林($R^2 = 0.44$)和阔叶林($R^2 = 0.60$)的相关性均达到显著水平($p < 0.05$)。然而,在10.8 mm次降雨事件中,三种森林类型的树干茎流体积均与林木胸径呈负相关,其中仅阔叶林的相关性($R^2 = 0.73$)达到显著水平($p < 0.05$)。在两次降雨事件中,针阔混交林树干茎流体积与林木胸径的关系均不显著(图4)。

2.3 相同降雨量下树干茎流体积与茎流率的季节差异

对比春、夏、秋、冬季的林分树干茎流体积,发现在相同次降雨量下,不同森林类型的树干茎流体积存在显著的季节(月份)差异。无论任何森林类型,均是冬季的树干茎流体积(17 770~35 590 mL)和茎流率(0.106)显著高于春、夏和秋季($p < 0.05$,图5),而树干茎流体积在前三个季节之间并无显著差异。具体到每个季节而言,3种森林类型在春季并无显著差异,针阔混交林的茎流体积在夏季和秋季均显著高于阔叶林($p < 0.05$,图5);此外,秋季针阔混交林的树干茎流体积还显著高于针叶林($p < 0.05$,图5)。在冬季,针阔混交林和阔叶林的树干茎流体积分别是35 590

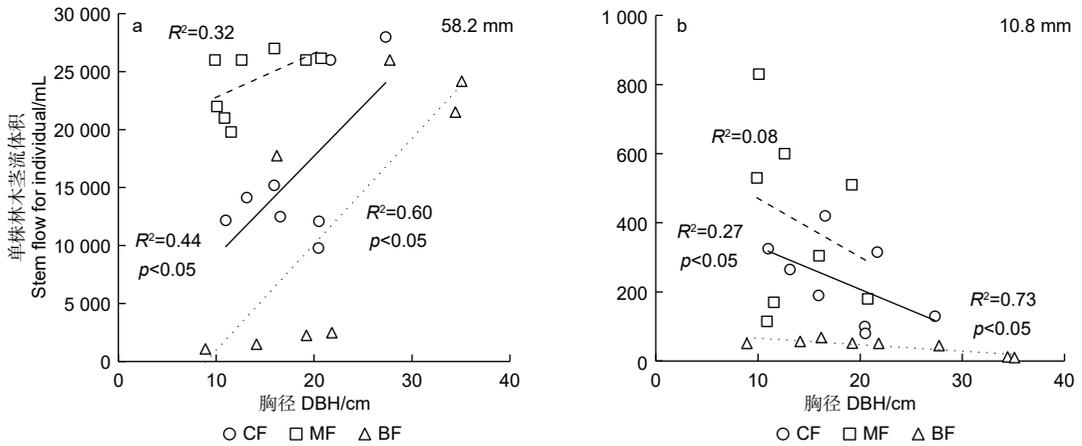
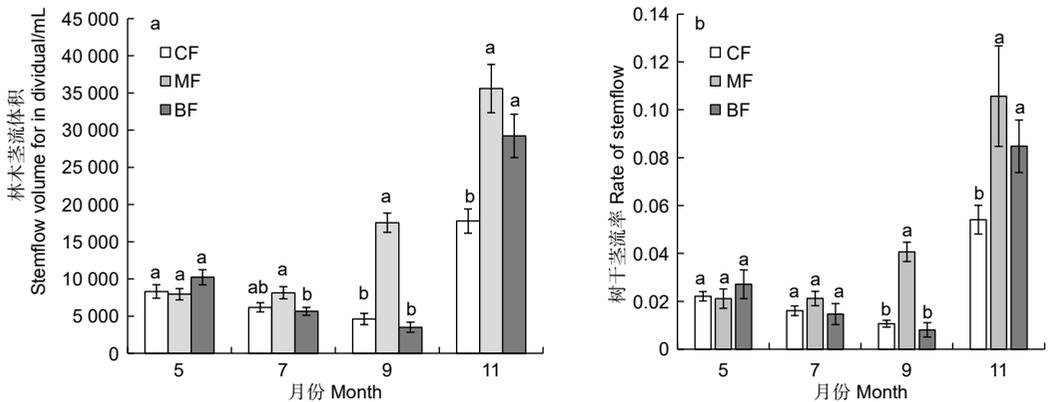


图 4 生长季期间两次不同降雨量下单株树干茎流体积与林木胸径的关系

Fig. 4 Relationships between stemflow volume of individual trees and diameter at breast height (DBH) in two rainfall events with different rainfall depths in growing season

mL 和 29 230 mL, 显著高于针叶林的树干茎流体积 (17 770 mL)($p<0.05$, 图 5)。此外, 针阔混交

林在秋季和冬季的茎流率更高 (图 5)。



注: 标记不同小写字母表示在 0.05 水平下达到显著差异

Note: Bars labeled with different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 levels

图 5 不同季节相同次降雨量下的林分树干茎流体积与茎流率的差异

Fig. 5 Comparison of stand stemflow volume and rate of stemflow under the same rainfall at different seasons

本研究还分析了不同季节的相同次降雨量下单株树木茎流体积与胸径的关系, 表明在春、夏、秋季, 三种森林类型的树干茎流体积与胸径均无显著的相关关系。然而, 在冬季, 针阔混交林单株树干茎流体积与林木胸径呈显著负相关关系 ($p<0.05$); 阔叶林单株树干茎流体积与林木胸径呈显著正相关 ($p<0.05$, 图 6); 针叶林的单株树干径流体积则与林木胸径无显著相关 (图 6)。

3 讨论

本研究发现在年际尺度上, 针阔混交林的林分树干茎流量显著高于针叶林和阔叶林, 这一结果与官司河流域的研究结果相近, 后者也发现针阔混交

林树干茎流高于其它林型^[13]。这种林分差异主要与林分结构、树皮糙度及树种叶片形态及凋落特征密切相关^[14]。首先, 本研究中针阔混交林的林分密度最大, 是针叶林和阔叶林的 1.6 倍和 1.4 倍 (表 1); 其林分郁闭度也最高, 因此能汇集更多的降雨进而导致更高的林分树干茎流, 这与人工林间伐郁闭度下降导致树干茎流降低的实验结论一致^[15]。其次, 针阔混交林内的林木平均胸径小于针叶林和阔叶林, 大径级林木的林冠层可截持更多降雨, 而小径级林木更易产生树干茎流。宝天曼地区降雨丰富, 中到小雨的发生频率更高 (约占全年降雨事件的 70% 以上), 相比于大胸径林木, 小径级林木在降雨量级不大时, 更易产生树干茎流。这与本研究发

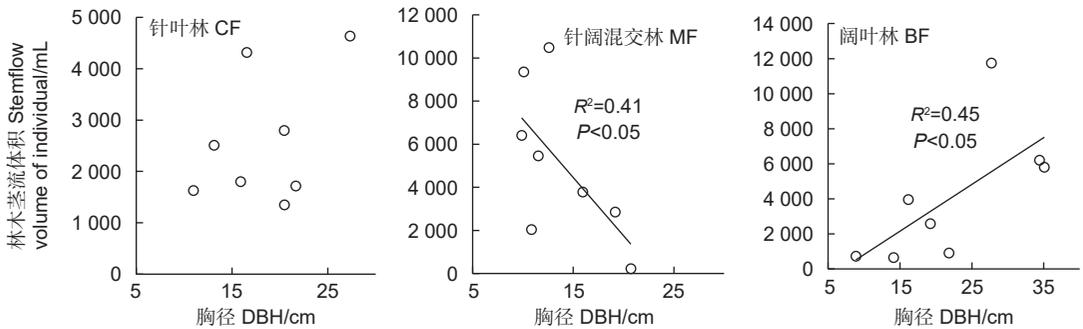


图6 冬季次降雨9.6 mm时不同林型单株树干茎流体积与林木胸径的关系

Fig. 6 Relationships between stemflow volume of individual trees and diameter at breast t height under 9.6 mm rainfall event in winter

现的高降雨量级下树干茎流体积与胸径呈显著正相关, 小量级降雨时树干茎流体积与胸径呈显著负相关的结果是一致的(图4)。在丹江口库区周边的研究证实, 不同树种产生树干茎流的降雨量阈值不同, 与林木冠幅大小及树干纹理密切相关^[16]。与亚热带地区研究结果不同^[17], 本研究发现针叶林的树干茎流量高于阔叶林, 本研究中的阔叶树是锐齿栎, 其树皮非常粗糙, 对低量级降雨及高量级降雨的早期树干茎流有较大吸持作用^[18]。

树干茎流的季节间差异广泛发生于不同气候带的森林^[19-21]。相比其它季节, 在相同降雨量级下的冬季树干茎流体积最高, 这种差异与林分结构特征密切相关^[22]。首先, 针阔混交林4个季节均有最高的树干茎流, 这主要归因于其较高的林分密度和减小的胸径, 这均有助于树干茎流形成。其次, 除华山松以外, 其他乔木及林下灌木树种在冬季均落叶, 树冠叶片的降雨截持作用消失^[23], 使降水有更大机率降落在枝条上并汇集到树干形成树干茎流, 这与图6中冬季阔叶林树干茎流与胸径正相关是吻合的。然而, 针阔混交林冬季树干茎流量与林木胸径呈负相关, 这主要与选择的标准木胸径有关, 该林分内华山松胸径相对大一点, 其作为常绿树种在冬季仍有较高林冠截留作用, 因此形成树干茎流相对较少; 而林分中胸径较小的阔叶树(主要是锐齿栎和鹅耳枥等)在冬季落叶后形成的树干茎流量更大。值得注意的是, 本研究选择的4个季节的降雨事件量级均是在9.6 mm左右, 生长季内的林冠树叶截留可大幅消减树干茎流量。如是更大量级的降雨, 则树干茎流的季节差异可能会不同。

4 结论

在伏牛山地区宝天曼森林生态站对3种典型天

然林的树干茎流研究表明, 生长季内高量级降雨条件下, 树干茎流体积与林木胸径呈正相关, 但在低量级降雨条件下树干茎流体积与胸径呈负相关。中低量级次降雨导致的树干茎流体积存在显著的季节差异, 冬季的树干茎流体积更高, 这与阔叶树落叶后的林冠截留能力减弱有关; 相比针阔混交林和阔叶林, 针叶林树干茎流的季节变异更弱。由于针阔混交林的林分密度较大和胸径较小, 其树干茎流较高。

参考文献:

- [1] 袁秀锦, 肖文发, 雷静品, 等. 三峡库区马尾松林穿透雨和树干茎流空间变异特征[J]. 林业科学, 2020, 56(1): 10-19.
- [2] 宗桦. 森林乔木冠层雨水再分配特征及机制研究综述[J]. 世界林业研究, 2019, 32(1): 28-35.
- [3] CARLYLE-MOSES DE, SCHOOLING JT. Tree traits and meteorological factors influencing the initiation and rate of stemflow from isolated deciduous trees[J]. Hydrol Process, 2015, 29(18): 4083-4099.
- [4] 王艳萍, 王力, 卫三平. Gash模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5445-5453.
- [5] LLORENS P, LATRON J, CARLYLE-MOSES DE, et al. Stemflow infiltration areas into forest soils around American beech (*Fagus grandifolia* Ehrh.) trees[J]. Ecohydrology, 2022, 15(2): e2369.
- [6] 余海龙, 樊瑾, 牛玉斌, 等. 灌丛树干茎流与根区优先流对灌丛沙堆“土壤沃岛效应”的影响研究[J]. 草地学报, 2019, 27(1): 1-7.
- [7] 盛后财, 蔡体久, 朱道光, 等. 原始红松林穿透雨和树干茎流养分特征研究[J]. 水土保持学报, 2008(5): 47-51.
- [8] 郑子龙, 杨海裕, 刘小林, 等. 小陇山林区锐齿栎林降雨再分配及矿质元素输入特征[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(2): 117-123.
- [9] 欧阳泽怡, 欧阳硕龙, 廖菊阳, 等. 樟树人工林树干茎流中无机阴离子变化特征研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(1): 15-22.
- [10] 杨双娜, 袁朝祥, 朱贵青, 等. 哀牢山常绿阔叶林穿透雨与树干茎

- 流水质特征研究[J]. 西部林业科学, 2020, 49(5): 109-116.
- [11] ASAOKA S, SUMIKAWA F, WATANABE Y, *et al.* Throughfall and stemflow chemical dynamics of Satoyama, a traditional secondary forest system under threat in Japan[J]. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33(3): 813-826.
- [12] SU L, XU W, ZHAO C M, *et al.* Inter- and intra-specific variation in stemflow for evergreen species and deciduous tree species in a subtropical forest[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 1-9.
- [13] 郑绍伟, 黎燕琼, 陈俊华, 等. 官司河流域防护林区大气降雨和树干茎流特征研究[J]. *四川林业科技*, 2010, 31(2): 60-63.
- [14] ZHANG H, LEVIA DF, HE B, *et al.* Interspecific variation in tree- and stand-scale stemflow funneling ratios in a subtropical deciduous forest in eastern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125455.
- [15] 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.
- [16] 崔鸿侠, 刘学全, 朱 玫, 等. 丹江口库区主要森林类型树干茎流研究[J]. *湖北林业科技*, 2012(4): 1-3 + 10.
- [17] 江森华, 吕茂奎, 胥 超, 等. 亚热带米栎次生林和杉木人工林林冠截留特征比较[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 116-121 + 126.
- [18] 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[J]. *生态学报*, 2010, 30(14): 3679-3687.
- [19] 赵泽敏, 吴福忠, 杨玉盛, 等. 中亚热带杉木人工林和米栎次生林树干茎流和穿透雨磷的动态特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 129-134.
- [20] 杨志鹏, 李小雁, 伊万娟. 荒漠灌木树干茎流及其生态水文效应研究进展[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 303-311.
- [21] 王 琼, 王善祥, 范志平, 等. 辽东山溪河岸林群落特征对降雨再分配及其养分特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 129-137.
- [22] GONZÁLEZ-MARTÍNEZ TM, WILLIAMS-LINERA G, HOLWERDA F. Interactive effects of functional traits and rainfall event size on stemflow in a tropical montane cloud forest[J]. *Ecohydrology*, 2022, 15(8): e2466.
- [23] GONZÁLEZ-MARTÍNEZ TM, WILLIAMS-LINERA G, HOLWERDA F. Understory and small trees contribute importantly to stemflow of a lower montane cloud forest[J]. *Hydrol Process*, 2017, 31(5): 1174-1183.

Seasonal Differences of Stemflow and Its Dependence upon DBH among Three Natural Forest Types in Funiu Mountain

NIU Bao-liang¹, LIU Yan-chun²

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. School of Life Science, Henan University, Henan, Kaifeng 475004, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to determine the differences of stemflow between different forest types and its relationships with diameter at breast height (DBH), and analyze the seasonal variations in stemflow between forest types under the same rainfall levels. [Method] Field measurement including standard tree selection and stemflow collection was conducted in three typical forest types located at Baotianman of Funiu Mountain. [Result] During the growing season, stemflow volume was positively correlated with DBH under high-level rainfall, but negatively related to DBH under low-level rainfall. Stemflow volume (17770~35590 mL) and stemflow rate (0.106) were greater in winter than spring, summer and autumn under the same rainfall level. There were no differences in stemflow volume among three earlier seasons. Higher stemflow rate was found for conifers-broadleaf mixed forest in autumn and winter, which could be explained by the weakened interception of leaf at canopy in winter. The results showed that mixed coniferous-broadleaf forest had greater stemflow than that of coniferous and broadleaf forest mainly due to its higher stand density and lower DBH. [Conclusion] The finding that differential stemflow among forest types associated with rainfall levels and DBH values indicates that DBH and leaf property are critical to determine the seasonal variation in stemflow.

Keywords: stemflow; Funiu Mountain; DBH; seasonal variation