

# 河北省太行山 4 种经济林林冠层的水文效应

刘希庆, 邢晓光, 刘凤婵, 刘斌, 王淮亮

(河北省水资源研究与水利技术试验推广中心, 河北 石家庄 050061)

**摘要:** [目的] 探索河北省太行山区 4 种经济林林冠层的水文效应, 揭示其水源涵养功能。[方法] 选取位于石家庄市西南部山区的核桃、苹果、杏、樱桃成林, 雨量筒测定穿透雨量, 树干缠绕法测定树干径流量, 分析林冠层水文效应。[结果] 4 种经济林的林内穿透雨量、树干径流量均随林外降雨量增加而增大; 林外降雨量达到 45.1 mm 之前, 林冠截留量随之增加而增大, 之后增大趋势减缓; 次降雨量在 14.3~29.5 mm 时, 4 种经济林的林冠截留作用最大, 截留量占比均在 20% 以上; 林外降雨量一定的情况下, 4 种经济林林冠层对降雨的截留量有较大差异, 其排序为: 樱桃>苹果>核桃>杏, 与郁闭度大小排序一致, 林内穿透雨量与截留量排序相反; 树干径流量排序为: 樱桃>杏>核桃>苹果, 与平均地径大小排序基本一致。[结论] 4 种经济林林冠层对降雨的再分配作用明显, 林冠截留作用主要与林外降雨量有关, 受林分类型、树冠结构特征如郁闭度、树木地径等的影响。

**关键词:** 太行山; 经济林; 林冠层; 水文效应

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2019)02-0083-05

**中图分类号:** S715.2

**文献参数:** 刘希庆, 邢晓光, 刘凤婵, 等. 河北省太行山 4 种经济林林冠层的水文效应[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 83-87. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 02. 013; Liu Xiqing, Xing Xiaoguang, Liu Fengchan, et al. Canopy hydrological effects of four economic forests in Taihang Mountain, Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 83-87.

## Canopy Hydrological Effects of four Economic Forests in Taihang Mountain, Hebei Province

Liu Xiqing, Xing Xiaoguang, Liu Fengchan, Liu Bin, Wang Huailiang

(Hebei Promotion Center of Water Resources Research and Hydrological  
Technology Experiment, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

**Abstract:** [Objective] The canopy hydrological effects of four economic forests in Taihang Mountains, Hebei Province were studied in order to reveal their water conservation functions. [Methods] Four main economic forests including walnut, apple, apricot, and cherry in the southwest mountainous area of Shijiazhuang City were selected. The throughfall was measured by rain tube, and the stemflow was measured by trunk winding method. The hydrological effects of canopy in these forests were then analyzed. [Results] The trunk runoff and throughfall of the four economic forests increased with the rainfall. The canopy interception increases with the rainfall until which reached 45.1 mm, and later the increasing trend slowed down. When the rainfall ranged from 14.3 to 29.5 mm at one precipitation event, the canopy interception of the four economic forests was the largest with 20% of interception percentage at least. When the rainfall was constant, the canopy interceptions of four economic forests were different, with following order, cherry>Apple>walnut>apricot, which was consistent with the order of crown density. The order of trunk runoff respected the following order, cherry>apricot>walnut>apple, which was basically consistent with the order of averaged base diameter. [Conclusion] The redistribution effect of canopy on the rainfall was obvious in the four

收稿日期: 2018-08-26

修回日期: 2018-09-06

资助项目: 河北省水利科技推广项目“河北太行山区主要经济林水土保持功能及栽培技术研究”(2016-016)

第一作者: 刘希庆(1974—), 男(汉族), 河北省阜城县人, 学士, 高级工程师, 主要从事水土保持技术研究工作。E-mail: 577269700@qq.com.

通讯作者: 邢晓光(1977—), 男(汉族), 河北省无极县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持与水资源保护方面的研究。E-mail: 403770318@qq.com.

economic forests, mainly related to the rainfall, and also influenced by the forest type, canopy density, and base diameter.

**Keywords:** Taihang Mountain; economic forest; forest canopy; hydrological effect

森林通过庞大的林冠层、丰富的枯落物层,既能吸附、截留一定的降雨,又能有效减轻或防止雨水冲击和侵蚀土壤<sup>[1-2]</sup>。林冠层是森林生态系统生态水文功能的主导者,林冠对降雨的分配是森林水循环的重要环节<sup>[3]</sup>,林冠截留是森林对降水第一次阻截和分配<sup>[4]</sup>,其截留作用在雨水的利用及水土保持方面有显著的积极作用<sup>[3-5]</sup>。目前国内外对于森林林冠层雨水截留的研究较多,主要是分析不同的林地类型、林分结构、林龄等在影响支配林冠层截留能力中起的作用,具体表现为叶面积指数<sup>[6-7]</sup>、郁闭度<sup>[8-9]</sup>、冠层深度和冠幅张开度<sup>[10-11]</sup>等与林冠截留量的关系。经济林作为一种生态效益、经济效益和社会效益结合较好的林种,在山区水土保持和生态建设中具有不可替代的作用,河北省太行山区经济林品种较多,对栽植树种的水文效应尚未进行系统研究。为此,本研究选择太行山区主要栽培的经济林树种苹果、核桃、樱桃和杏的成林,分析其林冠截留过程,对其林冠层水文效应做定量分析,旨在揭示不同经济林树种的水源涵养功能。

## 1 研究区概况

研究区位于河北石家庄市西南部山区,元氏县前仙乡西岭底村,地理坐标北纬 37°32′—37°51′,东经 114°08′—114°14′。该地区属典型的太行山中段东部低山区,山峦起伏、沟壑纵横,地势西高东低,海拔 290~550 m。气候属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,多年平均气温 12.6℃,极端最高温 43.0℃,高温天气多出现在 7 月份,极端最低温 -25.3℃,无霜期 180 d 左右,多年平均降水量 570 mm,多集中在 7—9 月份,占全年降水量的 70% 左右,在全球变暖大背景下,20 世纪 80 年代以来,也出现了温度升高,降水减少的趋势<sup>[12]</sup>。土壤以褐土为

主,兼有壤土、砂壤土或片麻岩石质土壤,样地整地类型为梯田,土层厚度在 0.5~2.5 m。栽植的经济林树种主要有苹果(*Malus pumila*),核桃(*Juglans regia*),杏(*Armeniaca vulgaris*)、樱桃(*Cerasus pseudocerasus*)等。自然植被类型以次生灌草丛为主,散生乔木,主要乔木树种有栓皮栎(*Quercus variabilis*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、栎树(*Koelreuteria paniculata*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)等,灌草丛是酸枣(*Ziziphus jujuba*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、野谷草(*Arundinella anomala*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选择

于 2017 年 8 月实地考察研究区植被特征,选择核桃、苹果、樱桃、杏 4 个树种的经济林,以场外空地作为对照。经济林样地位于西岭底村南,苹果和核桃林样地相邻,樱桃林和杏林相邻,两地块直线距离 450 m 左右,整地方式均为梯田,土层厚在 2.0 m 左右,壤土。由于经济林的栽培要求不同,田间管理有所差异,苹果和樱桃管理更加精细。在各林内典型地段设置面积为 20 m×20 m 的标准样地各 5 处,每个样地内布置样点 25 个。记录样地海拔、坡度、坡向以及土层厚度,调查林龄并进行每木检尺,测量株行距、树高、冠幅、地径等并记录(表 1)。

### 2.2 郁闭度测量

利用数码相机测定郁闭度,方法是在距离地面 1.5 m 高处使用镜头始终保持水平向林冠层拍照,借助 Adobe Photoshop CS 软件,将照片转为灰度双色调图像,统计整个冠层封闭区域和天空影像像素,郁闭度=(1-冠层范围内天空影像的像素值)/整个冠层范围像素值<sup>[13]</sup>,郁闭度测量结果详见表 1。

表 1 研究区 4 种经济林林分基本情况

| 树种 | 林龄/a | 株行距/m   | 树高/m     | 冠幅/m <sup>2</sup> | 地径/cm     | 郁闭度  |
|----|------|---------|----------|-------------------|-----------|------|
| 核桃 | 15   | 2.0×2.0 | 3.5±0.10 | 12.5±0.79         | 17.5±0.63 | 0.80 |
| 樱桃 | 14   | 2.0×2.0 | 3.5±0.06 | 19.6±0.82         | 27.1±0.45 | 0.85 |
| 苹果 | 20   | 2.0×2.0 | 3.5±0.16 | 14.6±1.21         | 22.9±1.01 | 0.82 |
| 杏树 | 15   | 2.0×2.0 | 3.0±0.11 | 12.0±0.61         | 25.5±0.35 | 0.79 |

### 2.3 林外降雨的测定

在样地外设置 2 个雨量筒,收集大气降雨,测定

空地降雨量,计为林外降雨量。为避免林地防风距离内其防风效应对林外风向、雨量的干扰,雨量桶的具

体位置设在样地林缘外 50~60 m 范围内,与林内样点坡向、海拔及方位相同的开阔地,离地 0.5 m,每次降雨内记录时间间隔为 30 min。

## 2.4 穿透雨量测定

由于穿透雨的空间分布受林冠结构的影响,为了研究穿透雨的空间异质性特征,采用林内网格状布置采样点能准确测定穿透雨量<sup>[14]</sup>。每个样地内按每 5 m×5 m 间距布设 25 个自制雨量筒来测定穿透雨量。自制雨量筒上部为直径 20 cm 的漏斗,下面接塑料桶,漏斗表面距地面高度 10 cm。为防止凋落物和昆虫进入塑料桶内影响测定结果,漏斗口底部加装尼龙网<sup>[15]</sup>,每次降雨后,测量塑料桶内的雨水体积(ml),然后换算成雨量深(mm)<sup>[16]</sup>。

## 2.5 树干径流量测定

每个样地内分别选择代表性植株 5 株,在树干基部 30 cm 以上,缠绕式方法收集树干径流。采用新型树干径流收集装置,是带有直径为 3 cm 的半圆形导水槽的胶管,铅丝穿进胶管将其缠绕至树干上 2~3 圈,将导水槽一侧紧贴树干,密封胶密封粘合,导水槽末端为管状,将水导至树下集水桶内。计量桶内水的体积(ml),最终换算成降雨量统一单位(mm)。树干径流量( $S_F$ , mm)的计算公式<sup>[17-18]</sup>为:

$$S_F = \frac{1}{SS \times 1\,000} \sum_1^5 C_i$$

式中: $S_F$ ——样地树干径流量(mm);  $C_i$ ——每株树干径流体积(ml);  $S$ ——树冠平均投影面积(m<sup>2</sup>)。

## 2.6 林冠截留量的计算

林冠截留包括树叶、树枝以及树干截留的降雨,其计算公式为:

$$I = P_G - (T_F + S_F)$$

式中: $I$ ——林冠截留量(mm);  $P_G$ ——林外降雨量(mm);  $T_F$ ——穿透雨量(mm)。

## 2.7 数据处理

采用 SPSS 18.0 对数据进行差异性检验(LSD)、相关分析(Pearson)、回归分析,采用 Excel 进行图表制作。

# 3 结果与分析

## 3.1 不同降雨量对林冠截留的影响

试验期 9—10 月间,共采集 5 次降雨,林外降雨量按时间先后依次为 7.5, 45.1, 54.9, 14.3 和 29.5 mm。测定了 4 种经济林林冠层在不同降雨量条件下的树干径流量、林内穿透雨量、林冠截留量,并分析其占比,结果详见表 2。

表 2 不同降雨量情况下树干径流量、林内穿透雨量、林冠截留量及其占比

| 树种 | 降水量/<br>mm | 树干径流量/<br>mm | 比例/<br>% | 林内穿透雨量/<br>mm | 比例/<br>% | 林冠截留量/<br>mm | 比例/<br>% |
|----|------------|--------------|----------|---------------|----------|--------------|----------|
| 核桃 | 7.5        | 0.05±0.00    | 0.73     | 6.71±0.33     | 89.52    | 0.73±0.33    | 9.75     |
|    | 14.3       | 0.12±0.01    | 0.84     | 10.92±2.42    | 76.36    | 3.26±2.42    | 22.80    |
|    | 29.5       | 0.28±0.01    | 0.96     | 22.96±3.98    | 77.83    | 6.26±3.98    | 21.21    |
|    | 45.1       | 0.65±0.01    | 1.44     | 37.54±7.43    | 83.24    | 6.91±7.43    | 15.32    |
|    | 54.9       | 0.73±0.01    | 1.33     | 47.36±3.56    | 86.27    | 6.81±3.55    | 12.40    |
| 樱桃 | 7.5        | 0.04±0.00    | 0.56     | 5.77±0.46     | 76.91    | 1.69±0.46    | 22.53    |
|    | 14.3       | 0.09±0.01    | 0.65     | 10.18±1.62    | 71.19    | 4.03±1.62    | 28.16    |
|    | 29.5       | 0.27±0.01    | 0.92     | 21.22±2.70    | 71.93    | 8.01±2.71    | 27.15    |
|    | 45.1       | 0.71±0.01    | 1.57     | 33.44±2.05    | 74.15    | 10.95±2.05   | 24.28    |
|    | 54.9       | 0.89±0.01    | 1.61     | 42.22±7.38    | 76.90    | 11.79±7.39   | 21.48    |
| 苹果 | 7.5        | 0.05±0.00    | 0.67     | 6.16±1.33     | 82.19    | 1.29±1.33    | 17.14    |
|    | 14.3       | 0.09±0.01    | 0.62     | 10.54±1.64    | 73.71    | 3.67±1.64    | 25.68    |
|    | 29.5       | 0.39±0.15    | 1.32     | 22.09±2.01    | 74.88    | 7.02±2.00    | 23.80    |
|    | 45.1       | 0.55±0.01    | 1.21     | 36.52±1.44    | 80.98    | 8.03±1.44    | 17.81    |
|    | 54.9       | 0.55±0.01    | 1.00     | 43.96±1.20    | 80.07    | 10.39±1.20   | 18.93    |
| 杏树 | 7.5        | 0.06±0.00    | 0.77     | 6.29±0.39     | 83.87    | 1.15±0.40    | 15.36    |
|    | 14.3       | 0.11±0.01    | 0.74     | 11.20±1.72    | 78.32    | 2.99±1.73    | 20.93    |
|    | 29.5       | 0.33±0.01    | 1.11     | 23.38±2.77    | 79.25    | 5.79±2.76    | 19.64    |
|    | 45.1       | 0.68±0.01    | 1.51     | 38.22±3.24    | 84.75    | 6.20±3.24    | 13.74    |
|    | 54.9       | 0.74±0.11    | 1.36     | 48.34±1.75    | 88.05    | 5.82±1.66    | 10.59    |

4 种经济林的树干径流量、林内穿透雨量均随着林外降雨量的增大而增大,呈正相关关系(显著性水

平 0.01)。对穿透雨量和林外降雨量数据进行回归分析表明,两者可以用一元线性回归模型表示,相关

系数均在 0.996 以上,这与之前<sup>[5]</sup>的研究结果一致。对 4 种经济林的林冠截留量与降雨量进行相关性分析,结果显示,4 种经济林的林冠层截留量与降雨量显著相关,其中,樱桃林、苹果林在 0.01 水平的相关系数分别为 0.986,0.977,核桃林和杏林在 0.05 水平的相关系数分别为 0.905,0.884。

4 种经济林的林冠截留量随着林外降雨量的增加表现不尽一致(图 1)。在林外降雨量达到 45.1 mm 之前,4 种经济林的林冠截留量均随着林外降雨量的增加而增加,且增加幅度较大;在林外降雨量达到 45.1 mm 之后,樱桃林增幅减小,杏林、核桃林的林冠截留量不再增加。这表明 4 种经济林分的林冠截留量主要决定于降雨量,并且可能与林冠冠幅、郁

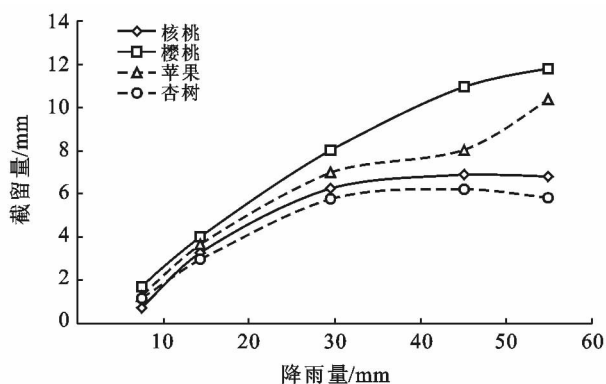


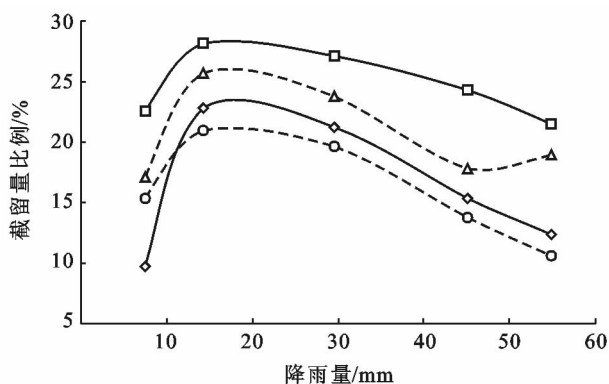
图 1 不同降雨量 4 种经济林林冠截留量及其占比

### 3.2 不同经济林林冠层对降雨的再分配

分析不同经济林林分林冠层对降雨的再分配的情况详见表 3。结果显示,在 5 次降雨过程中,林外降雨量合计 151.30 mm 情况下,不同经济林林分的林冠层对降雨的再分配情况存在较大差异。其中,苹果林的树干径流量显著低于其他 3 种经济林的相应值;林冠截留雨量樱桃林显著大于核桃林、杏林,林内穿透雨量显著小于核桃林和杏林。4 种经济林林冠层对降雨的截留量排序为:樱桃>苹果>核桃>杏,截留量最大的樱桃,是截留量最小杏的 1.66 倍,这与 4 种经济林的郁闭度由大到小排序一致;与另外 3 种经济树种相比,樱桃树冠幅大、枝叶密实,林冠结构紧

闭度等林冠结构特征有密切关系,这与之前的研究结果较为一致<sup>[19-21]</sup>。

由图 1 可见,在雨量为 14.3 mm 的降雨条件下,4 种经济林的林冠截留量占比达到最大值(28.16%,25.68%,22.80%,20.93%),且 4 种经济林的林冠截留量占比均表现出雨量为 29.5 mm 时的值大于雨量为 7.5 mm 时的值,由此可知,单次降雨量在 14.3~29.5 mm 时,4 种经济林的林冠截留作用较大。这也说明,林冠层持水量达到饱和后,林冠截留量占比呈现减少的趋势<sup>[5]</sup>,即林冠截留不会随降雨量增加无限增长,而是存在一个截留高峰的雨量区间,而且不同林木种类林分的这一雨量区间范围不同,区间的范围需进一步研究<sup>[19-20]</sup>。



凑、郁闭度大,说明林冠层对降雨的再分配作用主要受郁闭度、林分类型和林冠层结构乃至叶片结构和密度等的影响,这与之前的研究较为一致<sup>[3,5,21-22]</sup>。4 种经济林树干径流量排序为:樱桃>杏>核桃>苹果,这与 4 种经济林的平均地径由大到小排序一致,说明林地树干对降雨的再分配作用与林木地径或者林木径阶有较大关系。这与张捷等研究结果不同<sup>[5]</sup>,张捷等在对 18~32 a 生马尾松林的研究中指出,树干径流量与树木胸径呈负相关,这可能与两次研究对象的林木种类、林冠结构特征差异有关,本次研究是对不同树种不同地径的树干径流进行测定,同一树种不同地径的树干径流情况需要进一步研究。

表 3 4 种经济林林冠层对降雨的再分配

| 经济林 | 树干径流量/<br>mm            | 比例/<br>% | 林内穿透雨量/<br>mm             | 比例/<br>% | 林冠截留量/<br>mm             | 比例/<br>% |
|-----|-------------------------|----------|---------------------------|----------|--------------------------|----------|
| 核桃  | 1.84±0.02 <sup>b</sup>  | 1.21     | 125.49±8.59 <sup>a</sup>  | 82.94    | 23.97±8.59 <sup>b</sup>  | 15.84    |
| 樱桃  | 2.00±0.02 <sup>a</sup>  | 1.32     | 112.83±6.84 <sup>b</sup>  | 74.57    | 36.47±6.83 <sup>a</sup>  | 24.10    |
| 苹果  | 1.63±0.14 <sup>c</sup>  | 1.07     | 119.27±2.64 <sup>ab</sup> | 78.83    | 30.40±2.60 <sup>ab</sup> | 20.09    |
| 杏树  | 1.92±0.12 <sup>ab</sup> | 1.27     | 127.43±2.07 <sup>a</sup>  | 84.22    | 21.95±2.16 <sup>b</sup>  | 14.51    |

注:不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

## 4 结论

(1) 4种经济林的树干径流量、林内穿透雨量均随着林外降雨量的增大而增大,呈正相关关系(显著性水平0.01),穿透雨量和林外降雨量之间可以用一元线性回归模型表示;林冠层截留量与降雨量显著相关,其中,樱桃林、苹果林在0.01水平的相关系数分别为0.986和0.977,核桃林和杏林在0.05水平的相关系数分别为0.905,0.884;在林外降雨量达到45.1mm之前,4种经济林的林冠截留量均随着林外降雨量的增加而增加,且增加幅度较大;在雨量为14.3mm的降雨条件下,4种经济林的林冠截留量占比达到最大值,单次降雨量在14.3~29.5mm时,4种经济林的林冠截留作用较大,占比均在20%以上。

(2) 林外降雨量一定的情况下,4种经济林林冠层对降雨的截留量排序为:樱桃>苹果>核桃>杏,与郁闭度大小排序一致,林内穿透雨量与截留量排序相反;树干径流量排序为:樱桃>杏>核桃>苹果,与4种经济林的平均地径大小排序基本一致。4种经济林林分的林冠层对降雨的再分配情况存在显著差异,主要受林分类型、林冠结构特征等的影响。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 曾大林. 对当代林业水土保持作用的几点认识[J]. 中国水土保持, 2000(6):25-27.
- [2] 黄荣珍, 岳永杰, 李凤, 等. 不同类型森林水库调水特性研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1):154-158.
- [3] 程传民, 王华伟, 陈赫男, 黄前水库上游生态修复区典型植被林冠层水文效应[J]. 中国水土保持, 2009(6):5-7.
- [4] 王德连, 雷瑞德, 韩创举. 国内外森林水文研究现状和进展[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(2):156-160.
- [5] 张捷, 刘洋, 张健, 等. 马尾松人工林林冠层降雨再分配及其氮磷特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6):1451-1458.
- [6] Limousin J M, Rambal S, Ourcival J M, et al. Modeling rainfall interception in a Mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 357(1/2):57-66.
- [7] 吕瑜良, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 川西亚高山不同暗针叶林群落类型的冠层降水截留特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11):2398-2405.
- [8] 孔维健, 周本智, 安艳飞, 等. 人工毛竹林水文生态功能的初步研究[J]. 林业科学研究, 2010, 23(5):713-718.
- [9] 鲜靖苹, 张家洋, 胡海波. 森林冠层水文研究进展[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3):96-104.
- [10] Park A, Cameron J L. The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5/6):1915-1925.
- [11] 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(1):206-213.
- [12] 李鹏飞, 刘文军, 赵昕奕. 京津冀地区近50年气温、降雨及潜在蒸散量变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3):137-143.
- [13] 秦仲, 李湛东, 成仿云, 等. 夏季栎树群落冠层结构对其环境温湿度的调节作用[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6):1634-1640.
- [14] 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, 35.
- [15] Zimmermann A, Germer S, Neill C, et al. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1/4):87-102.
- [16] 何常清, 薛建辉, 吴永波, 等. 岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9):1871-1876.
- [17] 曹云, 欧阳志云, 黄志刚, 等. 中亚热带杜仲人工林对降雨资源再分配的水文特征[J]. 资源科学, 2007, 29(2):52-59.
- [18] 胡天然, 王树力. 松花江干流六种水源涵养林林冠层降水分配[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(27):154-157, 160.
- [19] 周泽福, 林富贵, 宋吉红. 不同经营模式的水源涵养林生态防护功能研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(2):189-195.
- [20] 辛颖, 赵雨森. 水源涵养林水文生态效应研究进展[J]. 防护林科技, 2004(2):23-26.
- [21] 景国臣, 陈棣. 典型黑土区水土保持林冠层截留降雨分析[J]. 水土保持应用技术, 2015(6):1-3.
- [22] 马维玲, 石培礼, 宗宁, 等. 太行山区主要森林生态系统水源涵养能力[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4):478-489.