

# 浑河上游典型水源涵养林降雨再分配过程

于立忠<sup>1,2</sup>, 王 利<sup>1,2</sup>, 刘利芳<sup>1,2</sup>, 王海峰<sup>3</sup>, 高尚军<sup>3</sup>, 彭 辉<sup>4</sup>, 李 娜<sup>4</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院清原森林生态系统观测研究站, 沈阳 110016;  
3. 辽宁省清原县大苏河林场, 辽宁 清原 113312; 4. 辽宁省清原县大边沟林场, 辽宁 清原 113312)

**摘要:** 为明确浑河上游典型水源涵养林的降雨再分配过程, 以浑河上游地区 5 种典型水源涵养林(红松人工林、落叶松人工林、红松混交林、落叶松混交林、阔叶混交林)为研究对象, 应用自记式观测记录仪, 分析不同林型林冠层对降水再分配过程(穿透雨、树干茎流、林冠截留)的影响。结果表明: 各林型穿透雨量(率)、树干茎流量(率)、林冠截留量均随林外降雨量增加而增大; 穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量均与林外降雨量呈显著的线性正相关; 各林型穿透雨率、树干茎流率与林外降雨量呈显著的对数函数关系; 红松混交林、落叶松混交林的树干茎流率(32. 12%, 15. 44%)均高于阔叶混交林与红松、落叶松人工林, 红松、落叶松人工林的林冠截留能力(80. 66%, 77. 47%)高于阔叶混交林、针阔混交林。该结果为浑河上游地区水源涵养林的最优空间结构配置与经营管理提供科学依据。

**关键词:** 穿透雨; 树干茎流; 林冠截留; 水源涵养林

中图分类号: S715      文献标识码: A      文章编号: 1009-2242(2016)06-0106-05

DOI: 10. 13870/j. cnki. stbcbx. 2016. 06. 019

## Rainfall Redistribution Processes of Typical Water Conservation Forest in the Upper Reaches of the Hun River

YU Lizhong<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1,2</sup>, LIU Lifang<sup>1,2</sup>,

WANG Haifeng<sup>3</sup>, GAO Shangjun<sup>3</sup>, PENG Hui<sup>4</sup>, LI Na<sup>4</sup>

(1. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;*  
2. *Qingyuan Forest CERN, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;* 3. *Da Suhe Forest Farm, Qingyuan, Liaoning 113312;* 4. *Da Biangou Forest Farm, Qingyuan, Liaoning 113312*)

**Abstract:** In order to explore the redistribution processes of rainfall that were caused by canopy, five typical forest types in the upper reaches of the Hun River, including Korean pine plantation (KP), larch plantation (LP), broadleaf-Korean pine mixed forests (BKMF), broadleaf-larch mixed forests (BLMF) and broadleaved mixed forests (BMF) were studied. Throughfall, stemflow and canopy interception were recorded by automatic data recorder. The results showed that the throughfall, stemflow, and canopy interception in five typical forests increased linearly with an increase of rainfall. The rate of throughfall and stemflow logarithmically increased as rainfall increased. The stemflow in BKMF (32. 12%) and BLMF (15. 44%) was higher than those in KP, LP, and BMF. The canopy interceptions in KP (80. 66%) and LP (77. 47%) were higher than those in the other three forest types. This study provides the theoretical basis for the configuration of water conservation forest with the optimal spatial pattern and management strategies in the upper reaches of the Hun River.

**Keywords:** forestry canopy; throughfall; stemflow; canopy interception

森林生态系统具有多种服务功能(涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化空气等), 对生态安全、生物资源和生存环境的保护、实现社会经济可持续发展起着重要的生态屏障作用<sup>[1]</sup>。尤其森林水文研究已成为森林生态学、森林水文学以及水资源利用等研究中的重要组成部分<sup>[2]</sup>。

大气降水进入森林生态系统, 首先受到林冠层的影响, 对降水进行第一次截留分配, 将大气降水分配为林冠截留、穿透雨和树干茎流 3 部分<sup>[3]</sup>, 直接改变了降雨的空间分配格局, 影响了森林生态系统的水文循环和水量平衡, 结构合理的森林生态系统可以通过林冠层的截留降低雨水对地表的冲刷<sup>[4]</sup>, 具有非常重

要的生态水文意义<sup>[5]</sup>。国内外,针对林冠截留过程中的水量变化进行了大量研究,结果表明:降水通过林冠层后,林冠截留率为 10%~40%,穿透雨率为 60%~90%,树干茎流率为 0.5%~14%<sup>[6]</sup>,其中,林冠截留量的大部分以蒸发散的形式消耗于空气中,湿润冠层的蒸发率要远大于干燥冠层的蒸发率<sup>[7]</sup>,针叶林林冠截留率高于阔叶林<sup>[8]</sup>。影响林冠截留分配的主要因素包括林型、树木特征(林龄、郁闭度、胸径、树高、树皮粗糙度、分支角度)、降雨量、雨强、蒸发速率、风速等<sup>[9]</sup>,因此了解不同林型的降雨再分配过程,对于明确典型森林的水源涵养功能具有重要意义。

位于辽东山区的浑河上游是辽宁省大伙房水库的重要水源地(占大伙房水库年入库水量的 52.7%),担负着为沈阳、抚顺等辽宁中部城市群 2 300 万人口提供生活饮用水的重要任务,同时也是辽宁省重要的生态屏障<sup>[10]</sup>。如何构建结构合理的水源涵养林、提高水源涵养功能,是该区域森林生态系统功能提升的关键。为此,本文通过在浑河上游地区开展典型水源涵养林降雨再分配试验,探求不同类型水源涵养林对降水的再分配作用,揭示浑河上游典型水源涵养林林冠层降水再分配过程,为该区域水源涵养林水文过程的长期定位研究奠定基础。

1 研究区概况

研究区位于浑河上游的清原县大苏河乡长沙村,试验样地设置在中国科学院清原森林生态系统观测研究站(简称:清原站)试验林地内(41°51'9"N,124°56'11"E)。该区属于长白山余脉,海拔 456~1 116 m。气候属温带大陆性气候,年平均气温 3.9~5.4℃,最冷月为 1 月,最热月为 7 月,极端最高气温 36.5℃,最低气温-37.6℃,其中≥10℃年积温 2 497.5~2 943.0℃,无霜期 120~139 d,平均日照时数 2 433 h,年降水量 700~850 mm,降雨量集中在 6—9 月,生长季为 4—9 月<sup>[11]</sup>。该区土壤为棕色森林土,原生时期的代表植物为红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc),其中,阔叶红松混交林经长期破

坏后逐渐演变成成为天然次生林,主要乔木树种为蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla* Hance)、水曲柳(*F. mandshurica* Rupr.)、胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim)、桦树(*Betula* spp.)、杨树(*Populus* spp.)等;同时,由于 20 世纪五、六十年代又开展了次生林改造,区内人工营造了大量的长白落叶松(*Larix olgensis* Henty.)和红松人工林。主要灌木植物有:瘤枝卫矛(*Euonymus pauciflorus* Maxim.)、刺五加(*Acanthopanax senticosus* (Rupr. et Maxim.) Harms)、暴马丁香(*Syringa reticulate* (Blume) H. Hara var. *amurensis* (Rupr.) J. S. Pringle)、五味子(*Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill.)、长白忍冬(*Lonicera ruprechtiana* Regel)、软枣猕猴桃(*Actinidia arguta* (Sieb. et Zucc.) Planch. ex Miq.)、鼠李(*Rhamnus davuricus* Pall.)和东北山梅花(*Philadelphus schrenkii* Rupr.)等,主要草本植物有:蕁麻叶龙头草(*Meehania urticifolia* (Miq.) Makino)、白花碎米荠(*Cardamine leucantha*)、珠芽艾麻(*Laportea bulbiifera* (Sieb. & Zucc.) Wedd.)、透茎冷水花(*Pilea pumila* (L.) A. Gray)和球果堇菜(*Viola colina* Bess)等<sup>[11]</sup>。

2 研究方法

2.1 样地设置

2014 年 5 月,选择研究区有代表性的 5 种林分类型:阔叶混交林、红松人工林、落叶松人工林、红松与阔叶树的混交林(以下简称“红松混交林”)、落叶松与阔叶树的混交林(以下简称“落叶松混交林”)作为研究对象,在每种林型的典型地段设置标准地(重复 3 次),标准地面积为 20 m×30 m。在标准地内进行每木检尺,实测林木胸径、树高等林分因子,应用全天空照片法测定林分的郁闭度,并对林下灌木、草本植物进行了种类与数量的调查,对标准地的立地因子等进行了详细的调查,各林分标准地基本情况见表 1。

表 1 试验样地基本概况

| 林型     | 林龄/<br>a | 平均<br>树高/m | 平均<br>胸径/cm | 平均<br>冠幅 /m | 郁闭度  | 密度/<br>(株·hm <sup>-2</sup> ) | 树种<br>组成      | 林下<br>灌木 | 海拔/<br>m | 坡度/<br>(°) | 坡位 | 坡向 |
|--------|----------|------------|-------------|-------------|------|------------------------------|---------------|----------|----------|------------|----|----|
| 落叶松混交林 | 25       | 10.2       | 12.0        | 4.1         | 0.80 | 1650                         | 针叶:落叶=2.7:7.3 | 鼠李、卫矛    | 611      | 5          | 下  | 东  |
| 红松混交林  | 30       | 14.2       | 16.5        | 4.5         | 0.75 | 1750                         | 针叶:阔叶=2.9:7.1 | 忍冬、软枣子   | 612      | 12         | 中  | 西北 |
| 阔叶混交林  | 40       | 12.7       | 17.1        | 6.0         | 0.77 | 917                          | 蒙、千、花、胡等      | 五味子、山梅花  | 620      | 20         | 中  | 北  |
| 落叶松人工林 | 23       | 11.9       | 17.0        | 4.0         | 0.78 | 1109                         | 落叶松           | 忍冬、卫矛    | 560      | 9          | 中下 | 东  |
| 红松人工林  | 30       | 16.4       | 25.6        | 4.2         | 0.78 | 792                          | 红松            | 五味子、卫矛   | 635      | 12.5       | 下  | 东北 |

注:蒙为蒙古栎;千为千金榆;花为花曲柳;胡为胡桃楸。

2.2 林外降雨测定

利用清原站自动气象站记录林外降雨量,该气象站距离实验样地平均 1.5 km。为了便于统计分析,借鉴国家气象局与相关文献对大雨、中雨、小雨的划

分标准,将研究期间的降雨量划分为以下 5 个等级:小雨一阵雨(24 h 内降雨量<5 mm)、小雨一中雨(24 h 内降雨量 5~10 mm)、中雨(24 h 内降雨量 10~25 mm)、大雨(24 h 内降雨量 25~50 mm)和暴雨(24 h

降雨量超过 50 mm 的降水过程)<sup>[12]</sup>。

### 2.3 穿透雨测定

在每个标准地内随机设置 2 个穿透雨承接器(由 PVC 材料制作而成,其水平截面为长方形、长×宽×高为 2 m×0.2 m×0.05 m,上方设有开口以承接降雨,下方一端设有出水口),承接器距地面高度 1.5 m (减少林下灌木草本的影响),放置的水平倾斜角度为 5°(有出水口的一端位于最低点)。将穿透雨承接器出水口端用导管与自动翻斗式雨量计相连,该雨量计与多通道数据采集系统连接,自动记录,经脉冲信号的传输,自动转换为信号(精确度为 0.1 mm,采集间隔为 10 min),以测量穿透雨量与产生时间等。

### 2.4 树干茎流测定

根据标准地内乔木树种的径阶分布情况,分别选择径级为大、中、小(>25 cm,15~25 cm,<15 cm)的标准木各 2 株,将直径为 2.5 cm 的聚乙烯塑料管剖开后沿树干螺旋形固定在 1.2~1.4 m 高度处收集树干茎流,末端用导管将树干茎流引入自动翻斗式雨量计,该雨量计与多通道数据采集系统连接(精确度为 0.1 mm,采集间隔为 10 min),以测量树干茎流量与产生的时间等。因数据采集系统的供电设备等问题,部分林型(红松混交林)的降雨过程监测不完整,导致各林型监测到的降雨次数不完全相同。

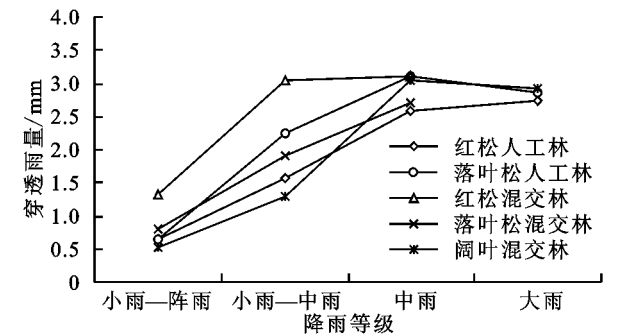
### 2.5 林冠截留计算

根据水量平衡原理,林冠截留量计算公式:  
$$I=P-T-S$$
式中: $I$  为林冠层截留量(mm); $P$  为大气降雨量(mm); $T$  为穿透雨量(mm); $S$  为树干茎流量(mm)。

林冠截留率计算公式:  
$$I_c=I/P$$
式中: $I_c$  为林冠截留率; $I$  为林冠层截留量; $P$  为大气降雨量。

### 2.6 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件对数据进行



5 种林型林内穿透雨量与穿透雨率均表现为随林外降雨量的增加而增大,穿透雨量与林外降雨量呈极显著的线性关系( $P<0.01$ ,图 2),穿透雨率与林外降雨量呈显著的对数函数关系( $P<0.05$ ,表 2),试验

相关性分析和回归方程的显著性检验。

## 3 结果与分析

### 3.1 降雨特征

在试验期间(2014 年 6 月 9 日至 9 月 30 日)共测得 31 场大气降雨,林外总降雨量为 315 mm,经统计分析表明,单次最大降雨量为 57.5 mm,最小降雨量为 0.8 mm,平均次降雨量为 10 mm,平均次降雨历时为 24 h。由图 1 可知,随降雨等级的增加,降雨的频率逐渐减少,全年中雨等级的降雨量最多;小雨一阵雨等级的降雨频率最高(42%),但雨量最小(30.1 mm),占总降雨量的 9.60%;暴雨等级的降雨频率最低(3.20%),但雨量为 57.5 mm,占总降雨量的 18.25%;小雨一中雨、中雨、大雨的降雨频率在逐渐下降,但降雨量基本在 71~81 mm,三者占总降雨量的 71.50%。

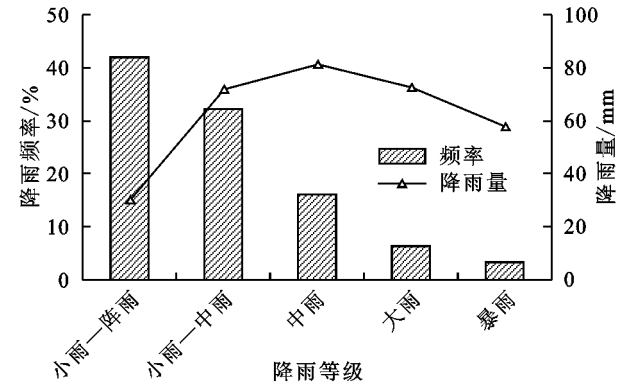
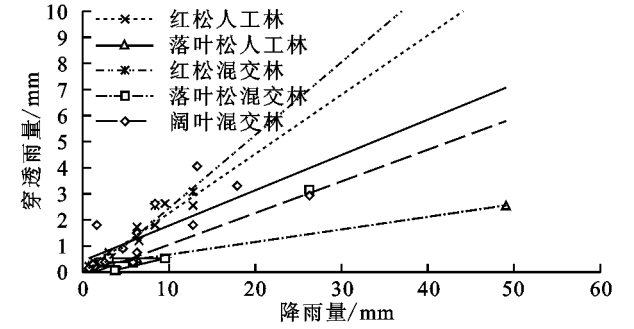


图 1 林外降雨频率与降雨量

### 3.2 不同林型的穿透雨

根据试验期间 31 场降雨数据,不同降雨等级下不同林型的穿透雨量如图 2 所示,其中小雨一阵雨强度下,红松混交林的穿透雨量最大(1.3 mm),其余 4 种林型的穿透雨量均在 0.5~0.8 mm 左右;小雨一中雨强度下,红松混交林的穿透雨量最大(3.1 mm),其次为落叶松人工林、落叶松混交林、红松人工林,阔叶混交林最低;中雨与大雨强度下,各林型的穿透雨量差异不大,均在 2.4~3.1 mm(图 2)。



期间各林型穿透雨量占林外总降雨量的比例为红松混交林(30.52%)>阔叶混交林(19.30%)>红松人工林(17.20%)>落叶松人工林(14.70%)>落叶松混交林(14.64%)。

3.3 不同林型的树干茎流

尽管树干茎流量占林外降雨量的 10% 以下<sup>[5]</sup>, 但因其将树干上的一些化学物质溶入树干茎流, 进入生物地球化学循环, 而在降雨分配中占有十分重要的作用。

不同降雨等级下不同林型的树干茎流量如图 3 所示, 其中小雨一阵雨强度下, 落叶松混交林的树干茎流量较大, 其次是红松混交林与阔叶混交林, 红松

人工林与落叶松人工林的树干茎流量最小; 小雨一中雨强度下, 红松混交林与落叶松混交林的树干茎流量最大, 其次是阔叶混交林、落叶松人工林, 红松人工林的树干茎流量最小; 中雨强度下, 3 种混交林的树干茎流量均显著高于红松与落叶松人工林( $P<0.01$ ); 大雨强度下, 阔叶混交林树干茎流量明显高于红松与落叶松人工林(图 3)。

表 2 不同林型穿透雨率、树干茎流率与林外降雨量的关系

| 林型     | 穿透雨率与林外降雨量关系          |       |          | 树干茎流率与林外降雨量关系        |       |          |
|--------|-----------------------|-------|----------|----------------------|-------|----------|
|        | 关系式                   | $R^2$ | $P$ 值    | 关系式                  | $R^2$ | $P$ 值    |
| 红松人工林  | $y=5.83\ln(x)+15.15$  | 0.50  | $P<0.05$ | $y=1.55\ln(x)+1.26$  | 0.64  | $P<0.05$ |
| 落叶松人工林 | $y=11.02\ln(x)+5.23$  | 0.39  | $P<0.01$ | $y=0.57\ln(x)+0.99$  | 0.49  | $P<0.05$ |
| 红松混交林  | $y=15.18\ln(x)-12.91$ | 0.37  | $P<0.05$ | $y=7.16\ln(x)+28.35$ | 0.86  | $P>0.05$ |
| 落叶松混交林 | $y=4.14\ln(x)-0.08$   | 0.21  | $P<0.05$ | $y=0.81\ln(x)+2.48$  | 0.32  | $P>0.05$ |
| 阔叶混交林  | $y=2.33\ln(x)+5.41$   | 0.38  | $P<0.05$ | $y=2.33\ln(x)+5.41$  | 0.38  | $P<0.05$ |

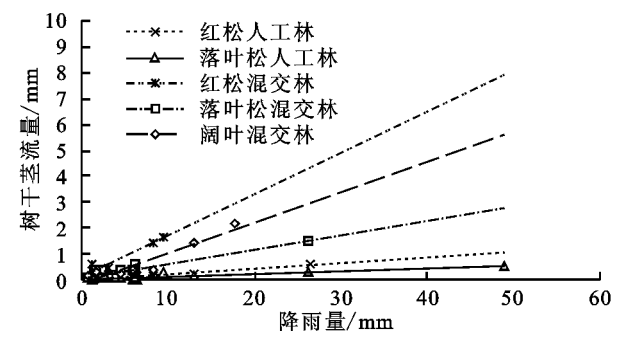
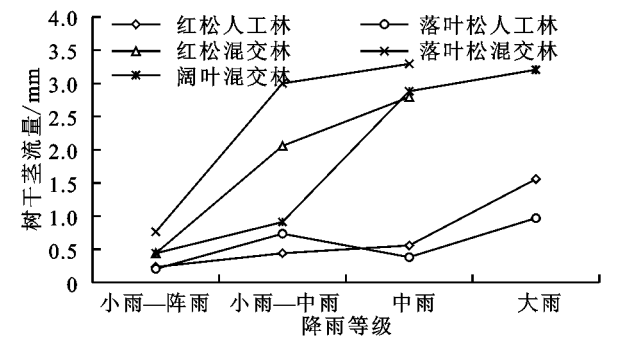


图 3 不同林型不同降雨等级的树干茎流量

5 种林型内树干茎流量与树干茎流率均随林外降雨量的增大而增大, 树干茎流量与林外降雨量呈极显著的线性关系( $P<0.01$ , 图 3), 树干茎流率与林外降雨量呈显著的对数函数关系( $P<0.05$ , 表 2), 试验期间各林型树干茎流量占林外总降雨量的比例为: 红松混交林(32.12%)>落叶松混交林(15.44%)>阔叶混交林(15.25%)>红松人工林(5.33%)>落叶松人工林(4.40%)。

3.4 不同林型的林冠截留

不同降雨等级下不同林型的林冠截留量见图 4。其

中, 小雨一阵雨强度下, 5 种林型的林冠截留量差异不大, 林冠截留量均在 0.8~1.5 mm 之间, 其中以红松、落叶松人工林较高; 小雨一中雨强度下, 5 种林型的林冠截留量差异略有增加, 林冠截留量在 2.0~5.2 mm 之间, 同样是其中红松、落叶松人工林较高, 其次是阔叶混交林, 红松阔叶混交林与落叶松阔叶混交林最低; 中雨强度下, 落叶松阔叶混交林的林冠截留量最大(31.7 mm), 其他几种林型的林冠截留量均在 7~12 mm; 大雨强度下, 红松、落叶松人工林与阔叶混交林的林冠截留量在 22~32 mm 之间。

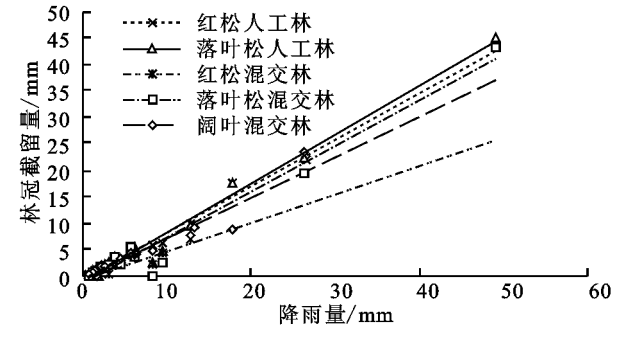
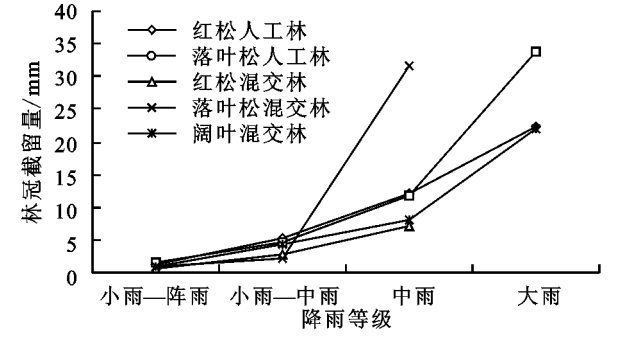


图 4 不同林型不同降雨等级的林冠截留量

不同林型内林冠截留量均表现出随林外降雨量的增大而增大, 林冠截留量与林外降雨量呈极显著的线性关系( $P<0.01$ ), 而林冠截留率与林外降雨量的相关性较小, 无明显的规律性, 由于各林型的特征不

同, 不同林型的林冠截留率也表现不同, 试验期间各林型林冠截留量占林外总降雨量的比例为: 落叶松人工林(80.66%)>红松人工林(77.47%)>阔叶混交林(65.17%)>落叶松混交林(69.91%)>红松混交

林(37.25%)。

## 4 结论与讨论

森林生态系统的林内穿透雨量主要受林外降雨量、观测点与树干之间的距离、观测点上方的冠层厚度、枝叶层厚度等<sup>[13]</sup>影响,并且存在明显的空间异质性<sup>[14]</sup>。本研究的 5 种典型水源涵养林(红松人工林、落叶松人工林、红松混交林、落叶松混交林、阔叶混交林)的穿透雨量和穿透雨率均随林外降雨量的增加而增大,穿透雨量与林外降雨量呈显著的线性正相关,穿透雨率与林外降雨量呈显著的对数函数关系,其中,红松混交林、落叶松混交林穿透雨量(率)较大,红松、落叶松人工林较小。与其他地区针叶林和阔叶林相比浑河上游地区各林型在小雨、中雨范围内穿透雨率均较低<sup>[15]</sup>。

树干茎流受到树皮粗糙度及干燥度、林冠特征(冠幅、林木分支角度、林冠厚度)、降水特征等多种因素影响,通常树干茎流量较小,占林外降雨量的 10% 以下<sup>[5]</sup>。本研究 5 种林型树干茎流量和树干茎流率均随林外降雨量的增加而增大,树干茎流量与林外降雨量呈显著的线性正相关,树干茎流率与林外降雨量呈显著的对数函数关系,其中红松混交林、落叶松混交林树干茎流量(率)较大,红松、落叶松人工林较小。5 种林型的树干茎流率为 4.40%~32.12%,相比温带森林树干茎流率(11.3%)偏高,这可能与研究期间多为小雨量级降雨有关,有研究表明,大雨量级降雨将导致树干茎流在传输过程中以穿透雨形式滴落,不利于树干茎流的形成<sup>[16]</sup>。通常,天然林树干茎流率高于人工林,混交林树干茎流率较针叶纯林高,这主要是因为其树皮相对较光滑,雨水较容易汇集到树干上<sup>[17]</sup>。本研究中,阔叶混交林和针阔混交林的树干茎流率均高于针叶人工纯林,这与部分阔叶树种(水曲柳、花曲柳)树皮相对较光滑有关,并且其林冠的冠幅较大,雨水较容易汇集到树干上。与其他地区林型相比,各林型树干茎流率偏高,与研究期间多为中、小雨量级降雨有关。

林冠截留是一个复杂、综合的动态过程<sup>[18]</sup>,包括冠层吸附和冠层蒸发两部分,二者同时发生,林冠截留主要受到降雨特征、林冠郁闭度、干燥程度、叶面积指数、叶片及树皮表面的吸水能力等影响<sup>[19]</sup>。本研究 5 种典型水源涵养林林冠截留率在 60%~70%,高于林冠平均截留率(21.6%)<sup>[20]</sup>,且针叶人工林的林冠截留率高于阔叶混交林与针阔混交林,与刘世荣等<sup>[20]</sup>研究结果相符。通常不同森林类型的截留率明显不同,针叶林树冠截留率大于阔叶林<sup>[21]</sup>,而对于少量的降雨,截留率可以高达 50%,甚至 100%。

不同雨量级下,各林型林冠截留率差异不明显,

但均表现出较高的截留率。本研究各林型林冠截留率相对偏高的原因:一方面,由于本次研究观测期内 75% 的降雨场次为 <10 mm 降雨,且降雨历时长,降雨强度较小,降雨过程中受风力和温度影响蒸发剧烈,而小雨量级的降雨截留率要远高于其他雨量级的截留率;另一方面,各林型的林冠均较大,郁闭度较高(0.8 左右),尤其是针叶人工纯林,能吸附更多的降雨;而且,本研究的林冠截留不仅仅包括林冠层的截留,其中树体的截留也包括在内,没有考虑冠层蒸发,也可能是导致林冠截留率高的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 王兵,任晓旭,胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学,2011,47(2):145-153.
- [2] 刘世荣,常建国,孙鹏森. 森林水文学:全球变化背景下的森林与水的关系[J]. 植物生态学报,2007,31(5):753-756.
- [3] Marin C T, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia[J]. Journal of Hydrology, 2000, 237(1):40-57.
- [4] 赵海荣,帅伟,李静,等. 华西南屏区几种典型人工林降雨截留分配特征[J]. 水土保持学报,2014,28(6):94-100.
- [5] Wei X, Liu S, Zhou G, et al. Hydrological processes in major types of Chinese forest[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(1):63-75.
- [6] 胡珊珊,于静洁,胡堃,等. 华北石质山区油松林对降水再分配过程的影响[J]. 生态学报,2010,30(7):1751-1757.
- [7] Holwerda F, Bruijnzeel L A, Scatena F N, et al. Wet canopy evaporation from a Puerto Rican lower montane rain forest: The importance of realistically estimated aerodynamic conductance[J]. Journal of Hydrology, 2012, 414(2):1-15.
- [8] 孙向阳,王根绪,李伟,等. 贡嘎山亚高山演替林林冠截留特征与模拟[J]. 水科学进展,2011,22(1):23-29.
- [9] Brauman K A, Freyberg D L, Daily G C. Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(2):265-275.
- [10] 王利,于立忠,张金鑫,等. 浑河上游水源地不同林型水源涵养功能分析[J]. 水土保持学报,2015,29(3):249-255.
- [11] Zhu J J, Mao Z H, Hu L L, et al. Plant diversity of secondary forests in response to anthropogenic disturbance levels in montane regions of northeastern China[J]. Journal of Forest Research, 2007, 12(6):403-416.
- [12] 次仁曲西. 晋西黄土区人工油松林降雨再分配及林内降雨空间异质性研究[D]. 北京:北京林业大学,2014:23-27.