

华北石质山区油松林对降水再分配过程的影响

胡珊珊^{1,2}, 于静洁^{1,*}, 胡 堃^{1,2}, 金 明^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:森林通过降水再分配过程影响着流域的水量平衡和物质循环。根据 2005—2008 年汛期华北石质山区主要造林树种油松林的林外降雨、穿透降雨、树干径流定位观测数据,探讨了人工油松林对降雨再分配过程的影响。结果表明,测定期间 32 场次降雨过程中油松林穿透雨量、树干径流量和林冠截留量平均值分别为 8.67, 0.11, 1.07 mm; 透过率, 树干径流率和林冠截留率分别为 82.18% (57.74%—87.55%), 1.07% (0.22%—2.07%), 16.75% (11.01%—42.07%)。油松林冠层穿透降雨量、树干径流量和林冠截留量均与林外降雨量呈明显的线性关系 ($R^2 = 0.995$, $R^2 = 0.907$, $R^2 = 0.855$), 根据回归方程, 当林外降雨量大于 0.3 mm 时, 可发生穿透降雨, 当林外降雨量大于 3.51 mm 时, 可发生树干径流; 林冠截留率与林外降雨呈双曲线衰减趋势, 回归方程为 $y = 12.091 + 55.537/(x + 0.426)$ ($N = 32$, $R^2 = 0.685$)。典型次降雨再分配过程表明, 林冠不仅在量上对降雨进行再分配, 还在时程上进行了再分配。

关键词:华北石质山区; 油松林; 降水再分配

Impacts of Chinese Pine (*Pinus Tabulaeformis*) plantations on rainfall redistribution processes: a case study for the mountainous area of North China

HU Shanshan^{1,2}, YU Jingjie^{1,*}, HU Kun^{1,2}, JIN Ming^{1,2}

1 CAS Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Impacts of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) plantations on rainfall redistribution processes for the mountainous area of North China were investigated with observed data for 32 rainfall events from four wet seasons, June to September, during 2005—2008. The results showed that the average throughfall, stemflow, and canopy interception amounts were 8.67 mm (82.18%), 0.11 mm (1.07%), and 1.07 mm (16.75%), respectively. Throughfall, stemflow and interception amounts had statistically significant linear relationships with total rainfall ($R^2 = 0.995$, $R^2 = 0.907$, $R^2 = 0.855$, respectively). Throughfall occurs when the rainfall is greater than 0.3 mm and stemflow occurs when the rainfall is greater than 3.51 mm, based on the regression relationships developed in this study. The canopy interception rate varies hyperbolically with rainfall amount, and a regression equation was fitted as $y = 12.091 + 55.537/(x + 0.426)$ ($N = 32$, $R^2 = 0.685$). The temporal distribution of rainfall events was also modified by the Chinese pine canopy: throughfall and stemflow started two and 12 minutes later than rainfall for a typical rainfall event of 29.1 mm, and throughfall spanning period was about one hour longer for this 14.8 hour long rainfall event.

Key Words: mountainous area of North China; Chinese Pine forest; rainfall redistribution

森林对水文过程的影响主要表现在通过对大气降水的再分配(林冠截留、穿透降雨、树干径流)而影响到

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(40371025)

收稿日期: 2009-04-21; 修订日期: 2009-11-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yujj@igsrr.ac.cn

森林的水量平衡,从而对森林生态系统和流域的水分循环产生影响^[1-4]。林冠对降雨的截留作用既是水资源管理的重要内容,同时也包含在气候变化的研究范围内^[5]。国内外学者针对这一过程已开展了广泛的研究^[6-7],涉及的主要森林类型有针叶林^[8-11]、杉木林^[9]、高山栎林^[12]、温带落叶林^[13-14]、落叶混交林^[15]、亚热带常绿阔叶林^[16-18]、热带雨林^[19-20]等,研究表明,降雨通过林冠层后,林冠截留率为 10%—40%,林内降水透过率为 60%—90%,树干径流率为 0.5%—14%。已有研究主要针对不同林型林冠层在降水再分配过程中的水量变化,对于典型次降雨再分配过程的相关报道则较少。次降雨过程中,林冠层的截留损失很大程度上由蒸发速率与降雨速率的比值决定^[21]。研究典型次降雨再分配过程,能够更深入地理解森林水文过程和作用机制。

华北地区水资源短缺日趋严重,不同森林群落的水文分配过程对于该区的生态安全具有重要影响。目前针对华北地区常见的造林树种,如油松林、刺槐林、板栗林、栓皮栎林等对降水再分配的影响机理均有相关的研究报道^[22-25],但研究区比较单一,主要集中在密云水库流域,要全面认识该区的森林水文效应,不同区域的案例研究十分重要。

本文通过降雨再分配试验,基于 2005—2008 年汛期监测数据,探讨华北石质山区具有代表性的人工造林物种油松林对降水的再分配作用,主要包括穿透降雨量、树干径流量和林冠截留量及其与林外降雨的关系分析;典型次降雨再分配过程分析。

1 研究区概况

研究区位于河北省易县崇陵流域实验基地(115°21'E,39°23'N),地处太行山脉北端,大清水系白洋淀上游,海拔 85—300m,属温带大陆性季风区气候,多年平均降水量为 641.2mm,年平均气温 11.6℃。观测油松林为纯林,于 1958—1959 年间人工种植,林龄 50a,种植后呈自然生长状态,无采伐和其他人为扰动,位于山坡中上部,坡度 12°—15°,平均高 5—6m,胸径 11—12cm,郁闭度 70%。林下有酸枣(*Ziziphus jujube* var. *spinosa*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)等灌木零星分布,盖度 0.2。草本植物有中华卷柏(*Selaginella sinensis*)、白草(*Pennisetum flaccidum*)等,盖度 0.1。枯枝落叶层稀薄,平均厚度不足 1cm。

2 研究方法

2.1 数据采集

本研究主要采集记录次降雨过程的林外降雨、穿透降雨和树干径流数据。油松林观测小区面积为 20m × 20m,林外降雨由布设在试验标准地外的自记雨量计实时记录;林内降雨通过样地内随机布设 2 个 1m × 1m 的承雨器承接林内降雨,承雨器与地面保持约 1°的倾角,较低一端用胶管连接翻斗雨量计实时记录出流过程;树干径流采用橡皮导管法截取,并在树干基部连接自记雨量计进行实时记录。穿透降雨和树干径流量测量装置如图 1 所示。

2.2 数据分析

根据 2005—2008 年汛期(6—9 月份)实测结果,共获得 32 场次降雨大气降水、穿透降雨和树干径流有效数据。

林冠截留量根据式 1,通过观测的林外降雨量、穿透雨量和树干径流量计算求出:

$$I = P - (P_t + G) \quad (1)$$

式中, P 为林外大气降水量(mm); P_t 为穿透降雨量(mm); I 为林冠截留雨量(mm); G 为树干径流量(mm)。

使用 SPSS 专业统计分析软件对试验获取的数据进行相关分析和回归分析。

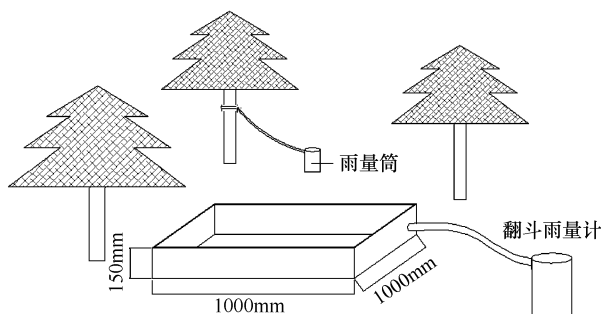


图1 穿透降雨和树干径流量测量装置示意图

Fig.1 Monitoring device for throughfall and stemflow

3 结果与分析

3.1 穿透降雨及其与林外降雨关系

试验期内,共测定降雨 32 场,降雨量达 337.6mm。据测定结果(表 1),平均次降雨量为 10.55mm,标准差 14.76mm,平均穿透降雨量为 8.67mm,标准差 12.69mm,穿透降雨占林外降雨总量的比例(透过率)为 82.18%。根据降雨量大小将 32 场降雨过程划分为 5 个降雨级别,在不同的降雨级别下,降雨透过率的变化幅度为 57.74%—87.55%,基本趋势为降雨透过率随降雨量级的增大而增大。

表 1 油松林降雨再分配量
Table 1 Redistribution amount of Chinese pine canopy

降雨量级 Rainfall Grade /mm	次数 No.	林外降雨 Rainfall /mm	穿透降雨 Throughfall /mm	透过率 Throughfall rate /%	树干径流 Stemflow /mm	径流率 Stemflow rate /%	截留量 Interception /mm	截留率 Interception rate/%
<5	18	2.43	1.4	57.74	0.005	0.22	1.02	42.07
5—<10	4	5.65	4.01	71.02	0.04	0.65	1.6	28.35
10—<25	6	20.64	17.6	85.25	0.2	0.96	2.85	13.78
25—<50	3	32.07	28.08	87.55	0.46	1.43	3.53	11.01
≥50	1	68	55.2	81.18	1.41	2.07	11.39	16.75
平均 Average	32	10.55	8.67	82.18	0.11	1.07	1.07	16.75

点绘穿透降雨和林外降雨如图 2 所示,穿透降雨和林外降雨的变化非常一致,具有明显的线性相关关系,回归方程如下:

$$y = 0.844x - 0.250 \quad N = 32 \quad R^2 = 0.995 \tag{2}$$

式中,y 为穿透降雨量(mm);x 为降雨量(mm)。由式 2 可以推知,当降雨量大于 0.3mm 时,可发生穿透降雨。

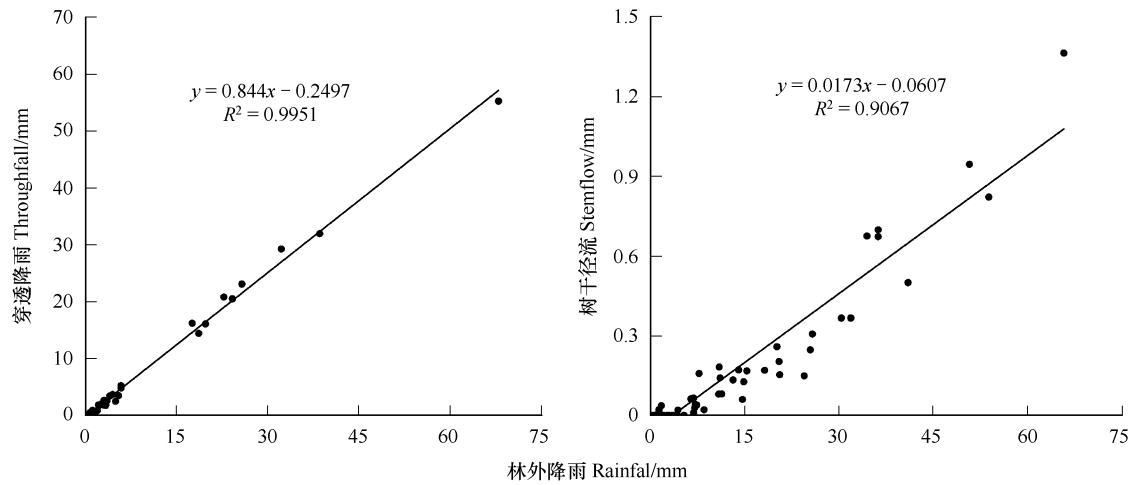


图 2 油松林穿透降雨、树干径流与林外降雨的关系
Fig.2 The relationship between throughfall, stemflow and rainfall

3.2 树干径流及其与林外降雨关系

据测定结果(表 1),次降雨过程中平均树干径流量为 0.11mm,树干径流占林外降雨的比例(径流率)为 1.07%。在不同的降雨量级中,树干径流率变化幅度为 0.22%—2.07%,变化趋势为径流率随降雨量级的增大而增加,但总体而言,树干径流量占林外降雨总量的比例非常小,可以忽略不计。

根据树干径流与林外降雨的关系图(图 2)可以看出,树干径流与林外降雨量也具有明显的线性相关关系,回归方程如下:

$$y = 0.0173x - 0.0607 \quad N = 32 \quad R^2 = 0.907 \quad (3)$$

式中, y 为树干径流量(mm); x 为降雨量(mm)。由式 3 可以推知, 当降雨量大于 3.51mm 时, 可发生树干径流。

3.3 林冠截留及其与林外降雨关系

据测定结果(表 1), 次降雨过程中平均林冠截留量为 1.07mm, 林冠截留率为 16.75%, 即平均有接近 1/5 的降水被林冠所截持, 使进入林地的净雨量减小。在不同的降雨量级中, 林冠截留率变化幅度为 11.01%—42.07%, 变化趋势基本为林冠截留率随降雨量级的增大而减小。

林冠截留量与林外降雨量也具有明显的线性回归关系(图 3), 回归方程为:

$$y = 0.143x + 0.2497 \quad N = 32 \quad R^2 = 0.855 \quad (4)$$

点绘林冠截留率与林外降雨量之间的关系如图 4 所示, 林冠截留率随林外降雨呈双曲线衰减趋势。在降雨量很小时, 林冠几乎截留了全部降水, 此时截留率最大; 随着林外降雨量的增加, 林冠截留率迅速降低, 当林外降雨量进一步增大时, 林冠截留率变化趋缓, 逐渐趋向最小截留率, 拟合的回归方程如下:

$$y = 12.091 + 55.537/(x + 0.426) \quad N = 32 \quad R^2 = 0.685 \quad (5)$$

式中, y 为林冠截留率(%); x 为降雨量(mm)。

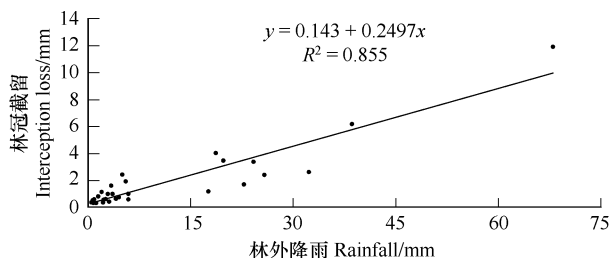


图 3 油松林林冠截留量与林外降雨量的关系

Fig. 3 The relationship between canopy interception amount and rainfall amount

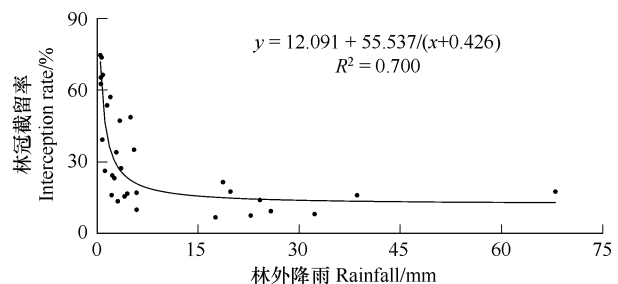


图 4 林冠截留率与林外降雨量关系

Fig. 4 The relationship between interception rate and rainfall

3.4 典型次降雨再分配过程

以 2006 年 5 月 24 日的次降雨为例(图 5), 分析单次降雨的再分配过程。林外降雨从 5 月 24 日 21:47 分开始至 5 月 25 日 12:35 分结束, 历时 14.8h, 降雨量为 29.1mm, 平均雨强为 1.97mm/h; 林内穿透降雨从 5 月 24 日 21:49 分开始至 5 月 25 日 13:38 分结束, 历时 15.8h, 穿透降雨量为 25mm, 降雨透过率为 85.9%; 树干径流从 5 月 24 日 21:59 分开始至 5 月 25 日 11:33 分结束, 树干径流量为 0.205mm, 树干径流率为 0.71%。

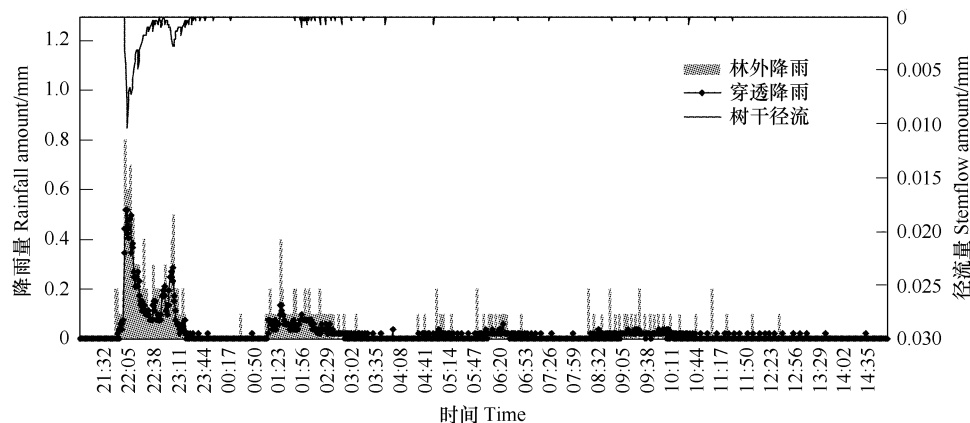


图 5 典型次降雨再分配过程

Fig. 5 Rainfall redistribution process in 2005-05-24

林外降雨开始 2min 后产生穿透降雨,开始 12min 后产生树干径流,林冠不仅在量上对降雨进行再分配,在时程上也进行了再分配。

4 结论与讨论

4.1 研究期内,共测定降雨 32 场,降雨量达 337.6mm,次降雨过程中油松林穿透雨量平均为 8.67mm,林冠透过率平均为 82.18% (57.74%—87.55%),高于陈丽华等^[22,25]在本地区的测定结果(67.65%)。油松林冠层穿透降雨量与林外降雨量呈明显的线性关系,与陈丽华等^[25]的研究结果一致。根据回归方程,可推断该地区产生穿透降雨的临界降雨量为 0.3mm。

穿透降雨在林内具有较大的空间变异^[11, 24, 26],冠层对穿透降雨具有一定的聚集效应,本研究虽采用承接面积较大的承雨器,但由于数量较少,不能充分反映穿透降雨的空间异质性,这也可能是造成穿透雨量较大的原因之一。因此,在以后的研究中,应采用林内随机布设一定数量的雨量器或定期调换雨量器的方法测量林内穿透降雨,降低因其空间异质性带来的误差^[12]。

4.2 研究期内,次降雨过程中油松林树干径流量平均为 0.11mm,树干径流率平均为 1.07% (0.22%—2.07%)。与其他研究中的油松林树干径流率相比,高于肖洋等(0.68%)^[22],低于赵鸿雁等(3.3%)^[4]的研究结果,这可能与林龄、郁闭度、树高等其他因素有关。与其他林分类型的树干径流率(0.1%—9.2%)相比^[27],本研究中油松林的树干径流率相对偏低。分析原因主要有:油松林树枝比较粗糙,而树皮粗糙的树种通常具有较低的干流率^[28];树枝分支角度很大,从而使冠层的水分很多不能通过树枝汇集于树干。树干径流与林外降雨量具有明显的线性相关关系,这与密云水库流域油松林的研究结果一致^[25]。根据回归方程,可推断该地区产生树干径流的临界降雨量为 3.51mm。

4.3 研究期内,次降雨过程中油松林林冠截留量平均为 1.07mm,林冠截留率平均为 16.75% (11.01%—42.07%)。已有的油松人工林冠层截留效应研究成果表明,油松林林冠截留率为 13.6%—36.97%^[29],本文的研究结果也在此范围内。与其他林分类型的林冠截留率相比,本研究中油松林林冠截留率比杉木林(25.8%)、热带季雨林(41.43%)、山地雨林(36.5%)小,比毛竹人工林(11.1%)和常绿阔叶林(10%)大^[27]。一般认为,叶细密,单位面积叶量大,小枝聚集形成稠密的树冠,蓄积量大的壮龄林截留功能强,截留率较大。

油松林冠层截留量与林外降雨量呈明显的线性关系,林冠截留率与林外降雨呈双曲线衰减趋势,随着林外降雨量的增加,林冠截留率逐渐趋向最小截留率,该林冠截留率虽然也受降雨等环境因素影响,但更多的反映了油松林林冠的生物学特征,是树种对水分传输的一个重要阈值。

4.4 典型次降雨再分配过程表明,林冠不仅在量上对降雨进行再分配,还在时程上进行了再分配。降雨落至林冠层后,大部分雨水或从林冠枝叶边缘滴落,或从树冠间隙直接落下,由于枝叶的阻挡,再通过观测装置导管传输,林内穿透降雨发生时间一般晚于林外降雨;降雨结束时,受风的影响,一部分储蓄在林冠层的降水继续下落,使得穿透降雨还将持续一段时间。降落至林冠层的雨水,除穿透降雨外,还以树干径流的形式落至地面,树干径流量占林外降雨的比例很小,但对土壤水的空间异质性、径流的形成都有重要的影响。由于树干径流的产生伴随着雨水对枝干的湿润、汇集和吸收过程,其发生时间晚于林外降雨和穿透降雨,具有比较明显的滞时效应,当降雨停止时,树干径流量结束时间可能早于林外降雨,也可能晚于林外降雨。可以看出,由于降雨量、降雨强度和小气候条件的时空变化复杂,同一场次降雨再分配过程的不同时段差异较大,需进一步细化次降雨再分配过程研究和加强不同次降雨过程的比较研究。

References:

- [1] Shi P L, Li W H. Influence of forest cover change on hydrological process and watershed runoff. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 481-487.
- [2] Zhang S L, Lei R D, Lu Y L, Ma Y H. Water-balance of forest eco-system in Huoditang area of qinling mountain. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(6): 18-22.

- [3] Chen X W. Water balance of watershed ecosystem in river upper reaches of Nenjiang. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(6): 903-907.
- [4] Zhao H Y, Wu Q X, Liu G B. Studies on hydro-ecological effects of artificial Chinese pine stand in Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(2): 376-379.
- [5] Arnell N W. Climate change and global water resources. Global Environmental Change, 1999, 9(Supplement 1): 31-49.
- [6] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Journal of Hydrology, 1982, 55(1/4): 3-23.
- [7] Bao W, Bao W K, He B H, Ding D R. Interception effects of forest ecosystems to precipitation; a review. Journal of Mountain Science, 2004, 22(4): 483-491.
- [8] Iida S, Tanaka T, Sugita M. Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. Journal of Hydrology, 2005, 315(1/4): 154-166.
- [9] Jiang H Y, Zhao Y S, Xin X J, Ma W H. Precipitation distribution laws of different forest stand in Daxing'anling. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6): 197-201.
- [10] Dang H Z, Dong T S, Zhao Y S. Canopy interception of *Pinus koraiensis*. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(10): 4-6.
- [11] Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, Xiong W, Yu P T, Guo H. Rainfall redistribution and its spatial variation in the stand of *Pinus armandii* in the Liupan Mountains, China. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 76-84.
- [12] He C Q, Xue J H, Wu Y B, Zhang L Y, Liu C, Liu X L. Rainfall redistribution in subalpine *Quercus aquifolioides* forest in upper reaches of Minjiang River. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 1871-1876.
- [13] Sraj M, Brilly M, Mikos M. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(1): 121-134.
- [14] Dang H Z, Dong T S, Zhao Y S. Study on canopy interception of *fraxinus mandshurica*. Forest Research, 2008, 21(5): 657-661.
- [15] 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.
- [16] Gong H D, Zhang Y P, Liu Y H, Yang G P, Lu Z Y, Lu H Z. Interception capability in an evergreen broad-leaved forest of Ailaoshan, Yunnan Province. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(4): 469-474.
- [17] Yan W D, Chen S J, Tian D L, Kang W X. Contribution of *Cinnamomum Camphora*(L.) Presl plantation to precipitation redistribution. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(6): 10-13.
- [18] Ren Y, Xue J H. Characteristics of precipitation in *Castanopsis eyrei* broad-leaved evergreen forest of Wuyi Mountain. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(2): 23-27.
- [19] Vernimmen R R E, Bruijnzeel L A, Romdoni A, Proctor J. Rainfall interception in three contrasting lowland rain forest types in Central Kalimantan, Indonesia. Journal of Hydrology, 2007, 340(3/4): 217-232.
- [20] Dietz J, Holscher D, Leuschner C, Hendrayanto. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. Forest Ecology and Management, 2006, 237(1/3): 170-178.
- [21] Link T E, Unsworth M, Marks D. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124(3/4): 171-191.
- [22] Xiao Y, Chen L H, Yu X X, Yang X B, Sun Q Y. Influence on precipitation distribution of *Pinus tabulaeformis* forest in Miyun reservoir. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 154-157.
- [23] Liu S H, Hu C H, Yu X X, Li G Y. Studies on precipitation distribution property of the water resources protection forest in the Miyun reservoir. Beijing Water Resources, 2003, (1): 14-16.
- [24] Zhan W Q, Zhang Z Q, Wu J, Xiao J Q. Spatial variability of throughfall in forest canopy layer of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) plantation in Northern China. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(3): 26-30.
- [25] Chen L H, Yang X B, Lu S W, Sun Q Y, Xiao Y, Wang Y. Distribution of water consumption of *Pinus tabulaeformis* plantation in rocky mountain areas in Northern China. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(Supp. 2): 182-187.
- [26] Shachnovich Y, Berliner P R, Bar P. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone. Journal of Hydrology, 2008, 349(1/2): 168-177.
- [27] Zhang Y P, Wang X, Wang Y J, Liu W J. Comparison research on hydrological effect of the canopy of the tropical seasonal rainforest and rubber forest in Xishuangbanna, Yunnan. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2653-2665.
- [28] Pypker T G, Bond B J, Link T E, Marks D, Unsworth M H. The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(1/2): 113-129.

- [29] Bao W K, He B H, Ding D R, Bao W. Redistribution effects of tree canopy of the artificial *Pinus tabulaeformis* forest on precipitation in the upper stream of Minjiang River. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26(5): 10-16.

参考文献:

- [1] 石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 481-487.
- [2] 张胜利, 雷瑞德, 吕瑜良, 马玉花. 秦岭火地塘林区森林生态系统水量平衡研究. *水土保持通报*, 2000, 20(6): 18-22.
- [3] 陈祥伟. 嫩江上游流域生态系统水量平衡的研究. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 903-907.
- [4] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林水文生态效应. *生态学报*, 2003, 23(2): 376-379.
- [7] 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.
- [9] 姜海燕, 赵雨森, 信小娟, 马文海, 李晓平, 孙程坤, 郭小伟. 大兴安岭几种典型林分林冠层降水分配研究. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 197-201.
- [10] 党宏忠, 董铁狮, 赵雨森. 红松林冠对降水的截留特征. *东北林业大学学报*, 2007, 35(10): 4-6.
- [11] 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.
- [12] 何常清, 薛建辉, 吴永波, 张雷燕, 刘冲, 刘兴良. 岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1871-1876.
- [14] 党宏忠, 董铁狮, 赵雨森. 水曲柳林冠的降水截留特征. *林业科学研究*, 2008, 21(5): 657-661.
- [16] 巩合德, 张一平, 刘玉洪, 杨国平, 鲁志云, 卢华正. 哀牢山常绿阔叶林林冠的截留特征. *浙江林学院学报*, 2008, 25(4): 469-474.
- [17] 闫文德, 陈书军, 田大伦, 康文星. 樟树人工林冠层对大气降水再分配规律的影响研究. *水土保持通报*, 2005, 25(6): 10-13.
- [18] 任引, 薛建辉. 武夷山甜槠常绿阔叶林林分降水分量特征. *林业科学*, 2008, 44(2): 23-27.
- [22] 肖洋, 陈丽华, 余新晓, 杨新兵, 孙庆艳. 北京密云水库油松人工林对降水分配的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 154-157.
- [23] 刘世海, 胡春宏, 余新晓, 李国元. 密云水库人工水源保护林降水再分配特征研究. *北京水利*, 2003(1): 14-16.
- [24] 战伟庆, 张志强, 武军, 肖金强. 华北油松人工林冠层穿透雨空间变异性研究. *中国水土保持科学*, 2006, 4(3): 26-30.
- [25] 陈丽华, 杨新兵, 鲁绍伟, 孙庆艳, 肖洋, 王宇. 华北土石山区油松人工林耗水分配规律. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 182-187.
- [27] 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.
- [29] 鲍文, 包维楷, 何丙辉, 丁德蓉. 岷江上游油松人工林对降水的截留分配效应. *北京林业大学学报*, 2004, 26(5): 10-16.