

六盘山半湿润区坡面华北落叶松林冠层截留的 时空变化及空间尺度效应

刘泽彬¹, 王彦辉¹, 田奥¹, 刘宇², 邓秀秀¹, 王晓¹, 王亚蕊¹, 于澎涛¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 冠层截留是森林蒸散的重要组成部分, 其定量描述一直是生态水文学研究的热点问题之一, 相关观测研究多是在固定样地的空间尺度上进行的。林冠截留量除在样地上受降水、气象条件和冠层结构及生长过程的动态影响外, 还在坡面上受植被生长和冠层结构的坡位差异而有很大空间变化和尺度效应, 需对此深入理解和精细刻画, 从而为实现从样地观测结果上推到坡面的尺度转换并基于此准确评价森林水文影响来提供科学依据。在六盘山香水河小流域, 选择一个水平坡长 425.1 m 的华北落叶松人工林典型坡面, 并均匀划分为空间连续的 16 个样地。于 2015 年 5—10 月, 测定了森林冠层结构(特别是叶面积指数, LAI)的坡位差异和动态变化, 并同步观测了林外降雨和林内穿透雨及树干茎流, 依此计算得到每次降雨事件的冠层截留量。以“离坡顶水平距离(水平坡长)”为尺度标量, 分析林冠截留量沿坡面的时空变化规律及影响因素。结果表明, 林冠截留量存在沿坡变化和坡面空间尺度效应, 且月份变化明显。在整个生长季, 林冠截留量沿坡变化总体表现为随水平坡长增加先升高, 在坡面中部达最大, 之后逐渐降低, 以每 100 m 水平坡长的变化量表示的坡面尺度效应为 +5.62 mm/100 m(坡段 0~316.6 m)和 -2.37 mm/100 m(坡段 316.6~425.1 m); 在 5 月, 林冠截留量沿坡变化总体表现为随坡长增加而逐渐降低, 坡面尺度效应为 -0.26 mm/100 m(0~425.1 m), 在 6—8 月, 林冠截留量沿坡变化总体趋势均和整个生长季相同, 6 月份坡面尺度效应为 +1.28 mm/100 m(0~261.1 m)和 -1.78 mm/100 m(261.1~425.1 m), 7 月为 +0.92 mm/100 m(0~267.6 m)和 -0.88 mm/100 m(267.6~425.1 m), 8 月份为 +1.28 mm/100 m(0~211.2 m)和 -0.34 mm/100 m(211.2~425.1 m); 在 9 月、10 月, 林冠截留量沿坡变化表现为随坡长增加逐渐升高, 坡面尺度效应分别为 +2.38 mm/100 m 和 +0.81 mm/100 m(0~425.1 m)。林冠层叶面积指数的坡位差异及其季节变化是影响林冠截留时空变化的主导因素, 各月林冠截留率均与叶面积指数呈显著正相关。可基于不同坡位样地的叶面积指数与其坡面均值的关系、叶面积指数与林冠截留量的关系以及不同坡位样地的叶面积指数测定值, 上推估计林冠截留的坡面均值。

关键词: 六盘山; 华北落叶松林; 坡面; 林冠截留; 时空变化; 尺度效应

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0231-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.05.036

Spatial-temporal Variation and Scale Effect of Canopy Interception on a *Larix principis-rupprechtii* Plantation Slope in Liupan Mountains, Ningxia, China

LIU Zebin¹, WANG Yanhui¹, TIAN Ao¹, LIU Yu²,

DENG Xiuxiu¹, WANG Xiao¹, WANG Yarui¹, YU Pengtao¹

(1. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry,

Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration,

Beijing 100091; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Canopy interception is a significant proportion of evapotranspiration of forest ecosystems, its quantification remains as one of hot issues in eco-hydrological studies. However, most studies were carried out just in the small scale of stand/plot. Since the canopy interception is influenced by many factors (e. g. rainfall, meteorological condition, canopy structure and growth process) at the stand/plot scale, and by the difference of forest canopy structure among slope positions, it often appears great spatial variation and scale effect at the slope scale. In order to realize the up-scaling from the measured value at plot to the whole slope, and to provide scientific basis for the accurate evaluation of forest hydrological impacts, the spatial-temporal

收稿日期: 2017-04-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(41671025, 41230852, 41471029, 41390461); 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0501603)

第一作者: 刘泽彬(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事森林生态水文、树木生理研究。E-mail: binarystar1989@163.com

通信作者: 王彦辉(1957—), 研究员, 博士生导师, 主要从事森林生态水文研究。E-mail: wangyh@caf.ac.cn

variation and scale effect of canopy interception along the slope has to be precisely described based on deep-going studies. In this study, a representative slope with a horizontal length of 425.1 m and covered by *Larix principis-rupprechtii* plantation was selected in the small watershed of Xiangshuihe of Liupan Mountains in northwest China, and it was evenly divided into 16 continuous plots. In the growing season of 2015 (from May to October), the dynamics of stand/plot canopy structure (especially the leaf area index, LAI) in different months and its difference among the 16 plots along slope position were monitored; meanwhile, the gross rainfall at open field and the throughfall and stemflow was measured to calculate the canopy interception of each plot during each rainfall event. The variation of canopy interception along slope positions and within different months and their main influencing factors were analyzed using the “horizontal distance from the slope top (horizontal slope length)” as a scale scalar. The results showed that the canopy interception presents a remarkable variation along the slope and spatial scale effect, with a remarkable difference among the months. During the whole growing season, the overall variation tendency of canopy interception with rising horizontal slope length showed firstly an increase, reaching its maximum at the middle slope, and then a decline. The scale effect was +5.62 mm/100 m within the horizontal slope length of 0~316.6 m and -2.37 mm/100 m within the horizontal slope length of 316.6~425.1 m. In May, the variation of canopy interception along rising horizontal slope length showed a decreasing tendency, with the scale effect of -0.26 mm/100 m within the horizontal slope length of 0~425.1 m. In June, July and August, the variation tendency of canopy interception along slope length was consistent with the whole growing season. In June, the scale effect was +1.28 and -1.78 mm/100 m within the horizontal slope length of 0~261.1 m and 261.1~425.1 m. In July, the scale effect was +0.92 and -0.88 mm/100 m within the horizontal slope length of 0~267.6 m and 267.6~425.1 m. In August, the scale effect was +1.28 and -0.34 mm/100 m within the horizontal slope length of 0~211.2 m and 211.2~425.1 m. In September and October, the variation of canopy interception along the slope showed an increasing tendency. The scale effect was +2.38 and +0.81 mm/100 m within the horizontal slope length of 0~425.1 m, respectively. The LAI was the main factor affecting the spatial-temporal variations of canopy interception. The correlation between canopy interception ratio and LAI was positive and significant in every month. The slope average of canopy interception could be estimated through the up-scaling from the measured LAI at certain plot, the relation between plot LAI at different slope positions and the slope average of LAI, and the relation between canopy interception and plot LAI.

Keywords: Liupan Mountains; *Larix principis-rupprechtii*; slope; canopy interception; spatial-temporal variation; scale effect

林冠截留作为水文循环的重要环节,对林地的降雨入渗、产流、土壤水分的空间分布以及蒸散等水文过程具有重要影响^[1-2],在森林生态系统水量平衡中也占有重要地位,并影响着局地或流域的水分循环^[3]。受林冠结构、密度、风及降雨等多方面因素的影响,林冠截留具有明显的时空变异^[4-6],其准确描述是精细评价森林水文影响的基础。

国内外学者已开展了大量林冠截留研究,但集中于不同森林类型和气候特征下的样地林冠截留差异及截留模型应用方面,对林冠截留时空变化及影响因素的研究还很少^[6-9]。He 等^[10]描述了青海云杉林样地内的冠层截留空间变化,指出植被表面积指数(PAI)是导致截留空间变化的主要因素,这仅是小空间尺度内的探索,并且缺乏时间动态变异特征研究。在作为流域基本空间单位的坡面这个关键研究尺度上,林冠截留不但具有坡位差异,还具有坡面尺度效应,需深入理解林冠截留的坡面变化规律和尺度效应

机理,但目前这方面的研究还很薄弱,需要予以关注和加强研究。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是我国北方的主要造林树种及宁夏六盘山地区的最重要造林树种,对当地的水源涵养、水土保持及生态环境改善有重要作用。因此,开展华北落叶松林冠层截留时空变化研究,对准确理解其生态水文功能有重要意义。本文在六盘山香水河小流域,选取一个华北落叶松林典型坡面,建立了空间连续的样地,测定分析林冠截留时空变化及坡面尺度效应,探讨主导影响因素,确定由样地测定值经尺度上推获得坡面平均值的尺度转化方法,从而为精细评价森林水文影响及确定相关模型参数提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏固原市六盘山南侧的香水河小

流域(106°09′—106°30′ E,35°15′—35°41′ N),面积为 43.73 km²,海拔 2 010~2 942 m。属温带半湿润气候,年均气温 6.0 ℃,年均降水量 632 mm,集中 6—9 月。天然次生林和人工林是该小流域的主要植被类型,次生林占小流域面积的 58%,主要树种有华山松(*Pinus armandii*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albosinensis*)等;人工林占小流域面积的 24%,主要树种为华

北落叶松,占人工林总面积的 90%,另有少量油松(*Pinus tabulaeformis*)等树种。

1.2 坡面选择及样地设置

依据坡面完整、林分起源和经营历史相似的原则,在分水岭沟子流域选择一个东南坡向的华北落叶松林典型坡面,其水平坡长 425.1 m,平均坡度 27.8°(表 1)。坡面上华北落叶松均为 34 a 生同龄林,可反映不同坡位植被生长的立地影响的差异。

表 1 典型坡面华北落叶松人工林样地概况

样地	海拔/ m	坡度/ (°)	水平 坡长/m	坡位	林分密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度	平均 胸径/cm	平均 树高/m	枝下高/ m	冠幅 直径/m
1	2471.4	26.3	26.9	坡上	942	0.73	20.25	16.71	5.53	3.22
2	2458.1	27.2	26.7	坡上	749	0.74	21.04	17.04	5.77	3.58
3	2444.4	24.4	27.3	坡上	854	0.72	20.34	17.04	5.83	4.31
4	2432.0	25.3	27.1	中上	870	0.73	20.01	17.40	5.93	4.07
5	2421.3	22.5	27.7	中上	746	0.75	19.94	17.54	6.22	3.22
6	2409.8	24.5	27.3	中上	831	0.68	18.46	15.72	5.44	3.53
7	2397.4	22.0	27.8	坡中	719	0.81	21.03	17.94	6.43	3.41
8	2386.1	26.8	26.8	坡中	933	0.79	20.28	17.12	6.18	3.37
9	2372.6	27.7	26.6	坡中	815	0.73	19.78	17.87	6.46	3.29
10	2358.7	20.1	28.2	中下	674	0.67	20.83	18.24	7.05	3.76
11	2348.4	17.9	28.6	中下	572	0.65	20.62	17.75	5.88	3.46
12	2339.2	30.0	26.0	中下	770	0.70	19.69	17.04	5.52	3.23
13	2324.2	30.4	25.9	坡下	786	0.74	19.93	18.07	5.77	2.81
14	2309.0	37.4	23.8	坡下	1035	0.75	18.07	16.57	5.85	2.93
15	2290.8	37.3	23.9	坡下	955	0.70	18.36	15.97	5.32	4.80
16	2275.6	34.9	24.6	坡脚	907	0.72	18.72	16.19	6.06	3.33

2015 年 5 月,在坡面上从坡顶至坡脚设置了一条宽 30 m 的观测样带,将其均匀划分为空间连续的 16 个 30 m×30 m(坡宽×坡长)的样地,各样地基本林分信息见表 1。各样地林下灌木发育不明显,覆盖度在 15%左右,主要有西北栒子(*Cotoneaster zabeilii*)、蒙古荚蒾(*Viburnum mongolicum*)和野李子(*Prunus salicina*)等。林下草本覆盖度 40%左右,主要有东方草莓(*Fragaria orientalis*)和苔草(*Carex*)等。

1.3 降雨、穿透雨及树干茎流的测定

林外降雨量由距坡面底部 100 m 处空旷地的 Weatherhawk 232 自动气象站测定,并在附近放置 1 个直径 20 cm 的标准雨量筒,用于雨量修正。

在每个样地内,按上、中、下部位均匀布设的原则,布设了截面积为 230.58 cm²(长 18.3 cm,宽 12.6 cm)的穿透雨收集器 12 个。观测时间为 2015 年 5—10 月。每次降雨结束后,立即用量筒测定各样地内雨量收集器中穿透雨的体积(mL),并换算成雨深(mm)。为保持观测结果的相对稳定性,穿透雨收集器的位置和方向始终保持一致。

在样地内,按胸径大小分为<16,16~20,20~24,>24 cm 4 个径级,每个径级各选择 2 棵树干茎流测定的样树,共 8 棵样树。从距地面 1.3 m 处,将剖开的聚乙烯塑料软管呈螺旋状向下缠绕在树干上,固

定后用玻璃胶将树干与塑料软管间的缝隙密封,同时在塑料软管基部连接一个容积 10 L 的塑料筒以收集树干茎流。每次降雨结束后,立即用量筒测定各塑料桶内树干茎流体积(mL),并换算成样地树干茎流深(mm),计算公式为:

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^N C_i \cdot M_i}{S_p \cdot 10^3}$$
 (1)

式中:SF 为样地树干茎流深(mm);N 为树干径级数;C_i 为 i 径级的树干茎流量(mL);M_i 为径级 i 的树木株数;S_p 为样地面积(m²)。

1.4 林冠截留量计算

林冠截留量计算基于冠层水量平衡,计算公式为:

$$I = P - TF - SF$$
 (2)

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)。

1.5 叶面积指数的测定

在 2015 年的 5—10 月,于每月的上、中、下旬,利用 LAI—2200C 冠层分析仪,测定各样地的林冠层叶面积指数(LAI),测定时按固定的“S”形路线,每个样地测定 38 个点,取平均值作为林冠层叶面积指数的特征值。

1.6 数据处理

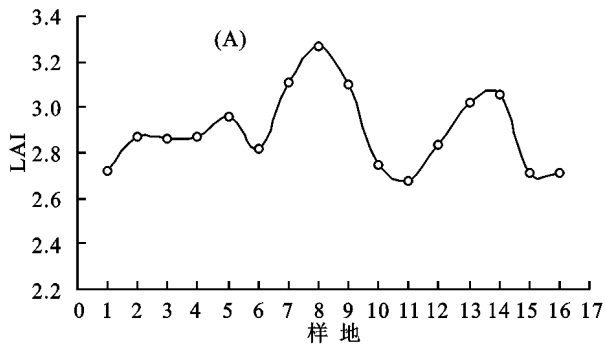
林冠截留量绝对值指各坡位样地林冠截留的实测值;林冠截留量相对值指各坡位样地林冠截留实

测值与坡面均值(整个坡面林冠截留量的加权平均值,简称坡面加权平均值)的比值。坡面尺度效应的评价方法是以坡面顶端为起点,通过样地的不断合并,逐步增加坡长,扩大空间尺度,绘制林冠截留量随尺度增大的变化曲线,研究林冠截留量的坡面尺度变化特征。具体评价指标是林冠截留量沿坡面滑动加权平均值随水平坡长增加的变化量,如水平坡长每增加 100 m 对应的林冠截留量的变化量。林冠截留量的坡面滑动加权平均值由公式(3)计算,当 $n=16$ 时,即为研究坡面(水平坡长 425.1 m)的坡面加权平均值。

$$I_a = \frac{I_1 \times L_1 + I_2 \times L_2 + I_3 \times L_3 + \dots + I_n \times L_n}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (3)$$

式中: I_a 为林冠截留量沿坡滑动加权平均值; $I_1, I_2, \dots, I_n$ 为不同坡位样地的林冠截留量(mm); $L_1, L_2, \dots, L_n$ 指不同坡位样地所代表坡段的水平坡长(m)。

利用 SPSS 19.0 软件进行 Pearson 相关性分析,



分析各月林冠截留率与对应月份叶面积指数、研究年份树高、胸径及林分密度等林分结构指标的相关性。

2 结果与分析

2.1 试验期间降水和样地 LAI 变化

试验期间(5月9日—10月31日)共收集 30 场降雨,累积雨量 548 mm,其中 6—9 月 469 mm,占生长季总雨量的 85.6%。降雨量的月份分配不均,主要集中在 6 月和 9 月,分别为 147,156 mm;其次为 7 月和 8 月,分别为 75,91 mm;5 月份和 10 月降雨较少,分别为 40,39 mm。

由图 1 可知,在整个生长季,坡面各样地冠层 LAI 为 2.68~3.27,变异系数 0.06,坡面均值 2.89。坡面各样地冠层 LAI 存在明显的月份差异,5—10 月分别为 2.49~3.02,2.82~4.13,3.25~4.19,3.31~4.41,2.75~3.07,0.64~1.49,变异系数分别为 0.05,0.10,0.08,0.07,0.03,0.28,坡面均值分别为 2.81,3.45,3.60,3.64,2.88,1.01。各样地冠层 LAI 的月份变化基本呈现先增后减的趋势,最大值出现在 7 月、8 月。

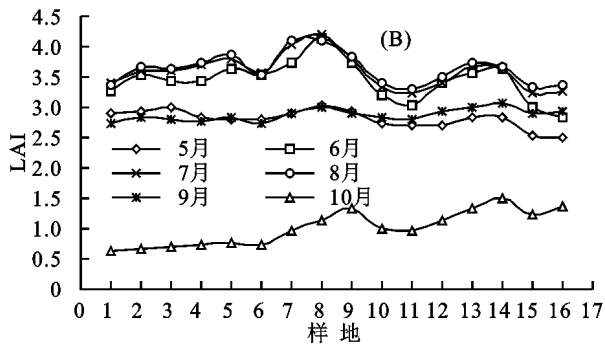


图 1 整个生长季(A)及生长季内各月(B)样地冠层 LAI 的变化

2.2 样地林冠截留量绝对值的坡面变化

由图 2 可知,整个生长季样地林冠截留量有明显的坡位差异,截留量为 64.1~102.0 mm,截留率为 11.7%~18.6%,其坡面加权平均值分别为 80.1 mm 和 14.6%,变异系数均为 0.15。依据各样地测定值与水平坡长的拟合曲线可知,不同坡位样地林冠截留量随离坡顶距离(水平坡长)增加总体表现为先升高,在坡中部(水平坡长 211.5 m 处)达最大,之后逐渐减小。

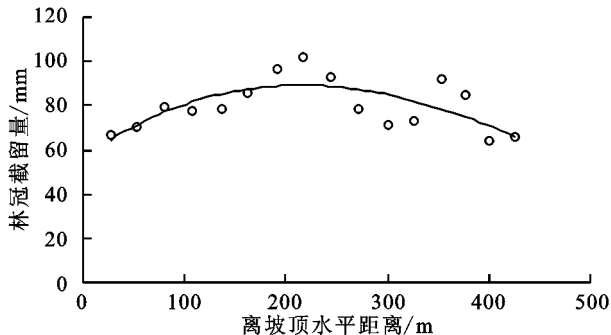


图 2 整个生长季林冠截留量随样地离坡顶水平距离的变化

样地林冠截留量的坡位变化存在月份差异(图 3)。5 月,各样地林冠截留量为 5.5~10.8 mm,截留率为 13.7%~27.0%,其坡面加权平均值为 8.7 mm 和 21.6%,变异系数均为 0.15;林冠截留量沿坡变化总体表现为随水平坡长增加逐渐降低。6 月,林冠截留量为 9.2~27.3 mm,截留率为 6.3%~18.6%,其坡面加权平均值为 20.4 mm 和 13.9%,变异系数均为 0.30;林冠截留量沿坡变化总体表现为随水平坡长增加先升高,在水平坡长 180.0 m 处达到最大值,之后逐渐减小。7 月,林冠截留量为 6.3~17.8 mm,截留率为 8.4%~23.8%,其坡面加权平均值为 10.7 mm 和 14.3%,变异系数为 0.30;林冠截留量沿坡变化总体为随水平坡长增加先升高,在水平坡长 159.1 m 处达到最大值,之后逐渐减小。8 月,林冠截留量为 9.3~15.8 mm,截留率为 10.2%~17.4%,其坡面加权平均值为 12.3 mm 和 13.5%,变异系数为 0.16;林冠截留量沿坡变化总体为随水平坡长增加先升高,在水平坡长 147.7 m 处达到最大,之后逐

渐减小。9 月,林冠截留量为 11.7~31.6 mm,截留率为 7.5%~20.2%,其坡面加权平均值为 21.1 mm 和 13.5%,变异系数为 0.26;林冠截留量沿坡变化总体为随水平坡长增加逐渐升高。10 月,林冠截

留量为 3.7~9.8 mm,截留率为 9.4%~25.1%,其坡面加权平均值为 6.9 mm 和 17.7%,变异系数为 0.29;林冠截留量沿坡变化总体为随水平坡长增加逐渐增加。

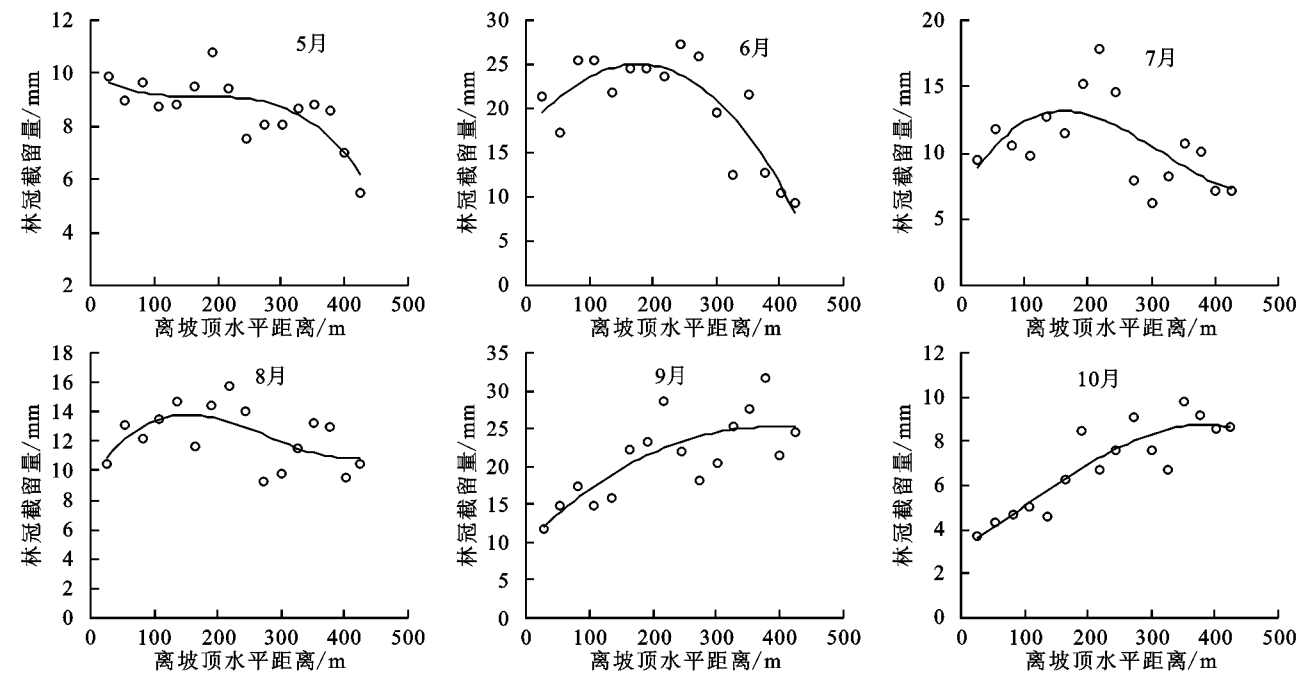


图 3 不同月份林冠截留量随样地离坡顶水平距离的变化

2.3 样地林冠截留量相对值的坡面变化

为更清楚地评价不同坡位样地林冠截留量对整个坡面的代表性,分析了不同坡位样地林冠截留量与坡面均值的比值(林冠截留量相对值)沿水平坡长增加(从坡顶向下)的变化。依据各样地林冠截留量相对值与水平坡长的拟合曲线可知(图 4),在整个生长季,不同坡位样地林冠截留量相对值基本呈现出随水平坡长增加先升高后减小的变化趋势,在坡段 0~96.9 m 和 343.5~425.1 m 处,样地林冠截留量相对值小于 1,在坡段 96.9~343.5 m 处,样地林冠截留量相对值大于 1。

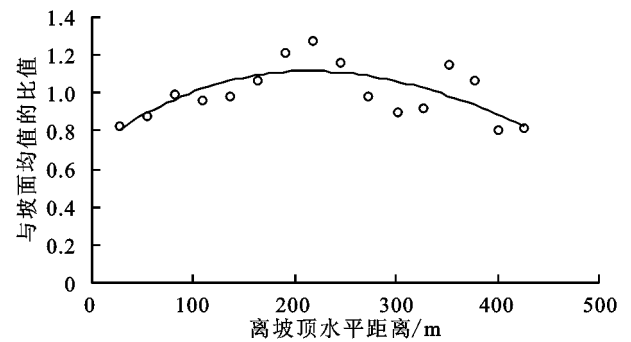


图 4 整个生长季不同坡位林冠截留量与坡面均值的比值随样地离坡顶水平距离的变化

不同坡位样地林冠截留量相对值的沿坡变化存在月份差异(图 5)。5 月,不同坡位样地林冠截留量相对值基本呈现随水平坡长增加逐渐减小的变化趋

势,在坡段 0~312.8 m 处,其值均大于 1,在坡段 312.8~425.1 m 处,其值均小于 1。6—8 月,林冠截留量相对值基本呈现出随水平坡长增加先升高后减小的变化趋势,但存在坡段差异。6 月,在坡段 0~36.2 m 和 311.6~425.1 m 处,其值均小于 1,在坡段 36.2~311.6 m 处,其值大于 1;7 月,在坡段 0~57.7 m 和 293.1~425.1 m 处,其值均小于 1,在坡段 57.7~293.1 m 处,其值大于 1;8 月,在坡段 0~60.1 m 和 279.7~425.1 m 处,其值均小于 1,在坡段 60.1~279.7 m 处,其值大于 1。9—10 月,其值基本呈现出随水平坡长增加逐渐升高的变化趋势,其中 9 月在坡段 0~186.0 m 内其值小于 1,在 186.0~425.1 m 内其值大于 1;10 月,其值在坡段 0~200.7 m 内小于 1,在 200.7~425.1 m 内大于 1。由此可见,不同坡位样地林冠截留量的坡面代表性存在较大差异,且月份变化明显,利用某一坡位(如坡下或坡中)样地的林冠截留量测定值来代表坡面均值将存在很大误差。

2.4 坡面林冠截留量模拟

林冠截留的空间差异主要与林分结构、立地因子、气象因子等的空间异质性有关。因此,可建立林冠截留量与主导因素的数量关系,并借助主导因子的样地测定值实现林冠截留量坡面均值的推算。相关分析表明(表 2),叶面积指数时空变化是导致坡面林冠截留时空变化的主导因素。虽然研究坡面海拔差

较小,降雨量在整个坡面中较为一致,但林冠截留量大小也直接受降雨量影响。为简化计算,本文直接在徐丽宏等^[11]基于叶面积指数和降雨量 2 个参数建立的林冠截留模型($I=dLAI[1-EXP(-CP/dLAI)]+aP$)基础上,利用 30 次降雨实测数据,拟合得到本研究中华北落叶松林冠截留量与叶面积指数和降雨量的关系:

$$I_s=0.481LAI_s[1-EXP(-CP/0.481LAI_s)]+0.085P$$
$$R^2=0.952$$

(4)

式中: I_s 为次降雨事件的林冠截留量的坡面均值(mm); LAI_s 为叶面积指数的坡面均值(降雨当天的

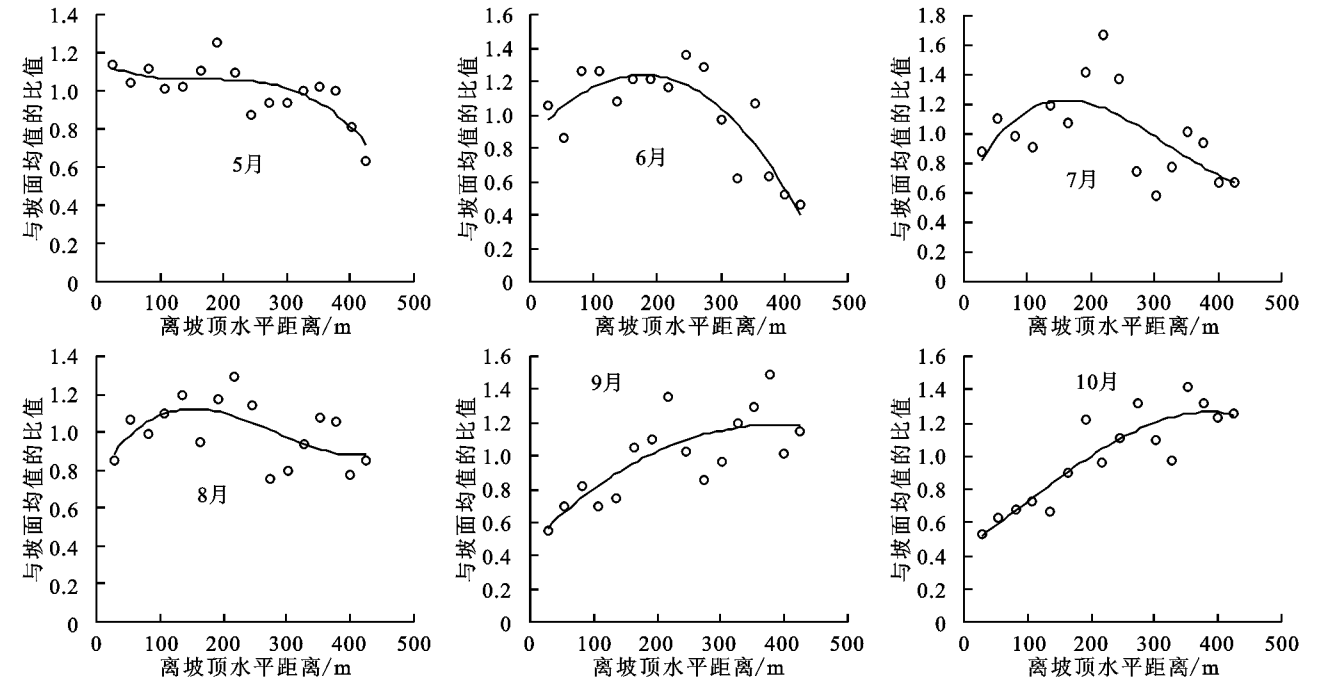


图 5 不同月份的不同坡位林冠截留量与坡面均值的比值随样地离坡顶水平距离的变化

笔者先前研究已得到该研究坡面上从不同坡位样地的 LAI 实测值上推坡面均值的关系式(表 3)。可根据这些关系式及公式(4),由任意坡位样地 LAI 的测定值及对应的降雨量,推求坡面林冠截留量均值。为验证该方法的精确度,利用 5 月份水平坡长 376.6 m、6 月份水平坡长 80.9 m、7 月份水平坡长 135.8 m、8 月份水平坡长 190.9 m、9 月份水平坡长 300.9 m 及 10 月份水平坡长 244.2 m 处的样地 LAI 测定值参与计算并进行检验,由表 4 可知,不同月份林冠截留坡面均值的预测值相对误差在 0.4%~21.3%,平均为 11.2%,在生长季中期(6—9 月)的平均预测误差仅为 6.4%,误差较大的是生长季开始和结束的月份,因而认为预测精度整体较高,尤其在叶面积指数逐渐稳定的 6—9 月。

2.5 林冠截留量的坡面尺度效应

为量化林冠截留随坡面长度(水平坡长)增加的空间尺度效应,建立了其坡面滑动加权平均值(I_a ,

叶面积指数由三次多项式内插得到); P 为林外降雨量(mm); C 为降雨拦截系数, $C=0.05LAI_s$ ^[12]。

表 2 各月林冠截留率与林冠结构及树木生长指标的相关性

月份	叶面积指数	林分密度	树高	胸径	枝下高	冠幅直径
5 月	0.750 **	0.285	0.224	0.460	-0.042	-0.141
6 月	0.527 *	0.039	0.560 *	0.557 *	0.486	0.003
7 月	0.958 **	0.351	0.239	0.272	0.313	-0.270
8 月	0.959 **	0.334	0.292	0.198	0.216	-0.350
9 月	0.865 **	-0.105	-0.091	-0.466	-0.004	-0.398
10 月	0.840 **	-0.459	0.172	-0.311	0.289	-0.178

注: * 表示显著相关($P<0.05$); ** 表示极显著相关($P<0.01$)。

mm)从坡顶向下沿水平坡长(x ,m)增加的回归关系。

表 3 生长季内各月华北落叶松样地 LAI 与坡面平均值(LAI_s)的比值(y)与离坡顶水平坡长(x)的关系

月份	拟合方程	R^2
5 月	$y=-6\times10^{-9}x^3+3\times10^{-6}x^2-0.0005x+1.053$	0.609
6 月	$y=3\times10^{-10}x^3-4\times10^{-6}x^2+0.0015x+0.9213$	0.432
7 月	$y=1\times10^{-8}x^3-1\times10^{-5}x^2+0.0027x+0.8716$	0.421
8 月	$y=1\times10^{-8}x^3-1\times10^{-5}x^2+0.0026x+0.8722$	0.401
9 月	$y=-1\times10^{-9}x^3+6\times10^{-7}x^2+0.0001x+0.9607$	0.452
10 月	$y=-1\times10^{-8}x^3+7\times10^{-6}x^2+0.0009x+0.5828$	0.800

表 4 不同月份林冠截留量坡面均值的预测值

月份	坡位(水平坡长)/m	预测值/mm	相对误差/%
5 月	376.6	6.8	20.5
6 月	80.9	18.8	7.1
7 月	135.8	12.0	12.1
8 月	190.9	12.2	0.4
9 月	300.9	20.0	6.0
10 月	244.2	5.5	21.3

由表 5 可知,各月方程相关系数均较高,且均在

0.01 水平上显著,可准确描述林冠截留量的坡面空间尺度效应。依据坡面滑动加权平均值与水平坡长的拟合曲线可知(图 6),在整个生长季,林冠截留量存在坡面尺度效应,且不同坡段有所差异,坡面尺度效应在 0~316.6 m 坡段内为+5.62 mm/100 m,在 316.6~425.1 m 坡段内为-2.37 mm/100 m。林冠截留量的坡面尺度效应还存在月份差异(图 7),5 月,坡段 0~425.1 m 内为-0.26 mm/100 m;6 月,0~261.1 m 内为+1.28 mm/100 m,坡段 261.1~425.1 m 内为-1.78 mm/100 m;7 月,0~267.6 m 内为+0.92 mm/100 m,坡段 267.6~425.1 m 内为-0.88 mm/100 m;8 月,0~211.2 m 内为+1.28 mm/100 m,

坡段 211.2~425.1 m 内为-0.34 mm/100 m;9 和 10 月,坡段 0~425.1 m 内分别为+2.38 mm/100 m 和+0.81 mm/100 m。

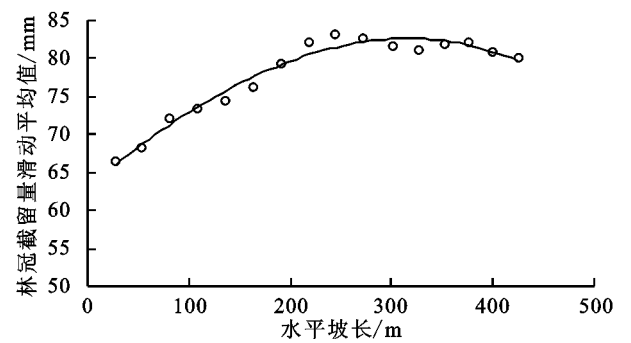


图 6 整个生长季林冠截留量滑动平均值随水平坡长增加的变化

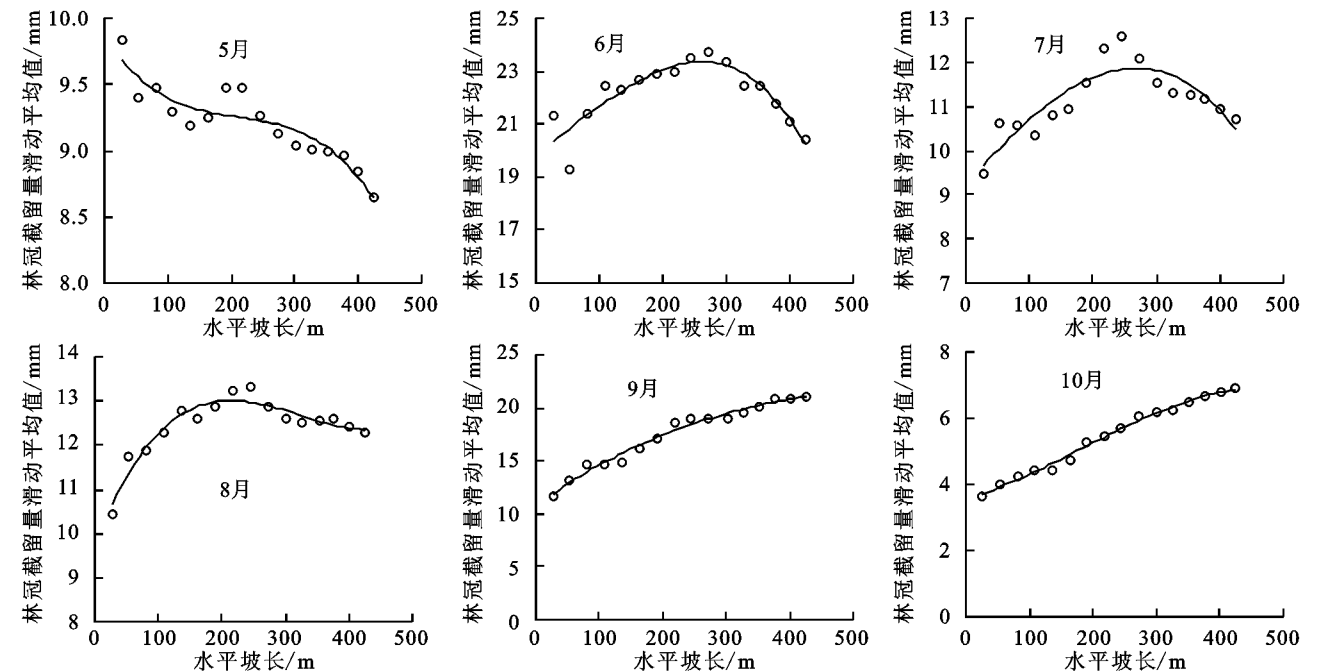


图 7 不同月份林冠截留量滑动加权平均值随水平坡长增加的变化

表 5 整个生长季及各月林冠截留量滑动加权平均值(I_a)与水平坡长(x)的回归关系

月份	方程	R^2	n	P
5 月	$I_a = -5 \times 10^{-8} x^3 + 3 \times 10^{-5} x^2 + 0.0071x + 9.8561$	0.842	16	<0.01
6 月	$I_a = -2 \times 10^{-7} x^3 + 3 \times 10^{-5} x^2 + 0.0161x + 19.916$	0.806	16	<0.01
7 月	$I_a = -5 \times 10^{-8} x^3 - 1 \times 10^{-5} x^2 + 0.0166x + 9.213$	0.770	16	<0.01
8 月	$I_a = 1 \times 10^{-7} x^3 - 0.0001x^2 + 0.0364x + 9.7603$	0.918	16	<0.01
9 月	$I_a = 3 \times 10^{-8} x^3 - 6 \times 10^{-5} x^2 + 0.044x + 10.785$	0.980	16	<0.01
10 月	$I_a = 4 \times 10^{-8} x^3 - 2 \times 10^{-5} x^2 + 0.0056x + 3.5592$	0.993	16	<0.01
生长季	$I_a = 1 \times 10^{-7} x^3 - 0.0001x^2 + 0.115x + 63.089$	0.968	16	<0.01

3 讨论

3.1 林冠截留量坡面变化的影响因素

受叶面积指数、郁闭度以及林分密度的影响,即使同一树种的林冠截留量,也存在明显的差异。在坡面上,受坡面土壤水分再分配以及微气象的影响,不同坡位树木的生长、冠层结构及密度均存在较大差异^[13-14],这必然导致林冠截留量存在坡位差异。李振华^[15]对六盘山半干旱区的研究发现,华北落叶松林冠截留量存在明显的坡位差异,自坡顶向下,随着水平坡长增加,林冠

截留量逐渐升高,在坡中下部达到最大,之后逐渐降低。本研究对六盘山半湿润区华北落叶松林冠截留的坡面变化研究发现,在整个生长季,林冠截留量沿坡总体变化趋势表现为随水平坡长增加先逐渐升高,在坡中上部达到最大值,之后逐渐降低,这与李振华^[15]在六盘山半干旱区的研究结果的变化趋势基本相同,但最大值出现位置不同。然而,进一步分析表明,这 2 个研究中林冠截留最大值均出现在坡面土壤含水量最高的位置,一般来讲,在西北干旱缺水地区,土壤水分充足的

坡位,植被生长也较好,相应的冠层覆盖度和叶面积指数也必然越高,林冠截留量也就越大。因此,这 2 个研究的具体差异很可能与不同气候区土壤水分沿坡再分配上的差异有关。

本研究表明,林冠截留量沿坡变化不是一成不变的,而是存在季节差异。对林冠截留与叶面积指数、树高、胸径、林分密度等林分指标的相关分析发现,各月林冠截留率均与叶面积指数呈显著正相关。由图 1 可知,研究坡面叶面积指数具有坡位差异,且季节变化明显,因此本研究中林冠截留量坡面变化的月份差异主要与叶面积指数的时空变化有关。这与一些学者的研究结果类似,如韩诚等^[16]对长三角地区毛竹林林冠截留的研究得出,林冠截留量的季节差异受叶面积指数季节变化的影响。Fleischbein 等^[17]对厄瓜多尔山地森林林冠截留的研究得出,叶面积指数是导致林冠截留量空间差异的关键因子。同时,一些学者在构建林冠截留模型时也将叶面积指数作为一个重要参数^[11],可见,叶面积指数对林冠截留具有重要影响。

3.2 林冠截留量的坡面尺度效应

很多研究均发现,径流、蒸散等水文过程存在空间尺度效应,如坡面径流深随坡长增加呈“减小—增加—减小”的变化趋势^[18],森林蒸散在样地尺度可比在流域尺度低 24.7%^[19]。本研究表明,林冠截留具有坡面尺度效应,表现为随坡长增加而变化。一般认为,林冠截留、蒸散及径流等水文过程的空间尺度效应主要是由其主导水文要素的空间差异所引起的。对同一坡面的水文要素空间变化研究表明^[13-14,20],树高、胸径、叶面积指数及土壤物理性质等均存在空间差异及坡面尺度效应。在本研究中,不同季节的林冠截留率均与叶面积指数呈显著正相关,表明林冠截留量的坡面尺度效应与叶面积指数空间差异有关。

3.3 不同坡位样地的坡面代表性

在以往的森林水文监测及森林水文模型参数获取时,由于工作量很大,很难对整个坡面进行全面观测,只能通过布设数量有限的典型样地进行观测,并认定其为整个坡面的特征值。但是,对典型样地的确定及如何根据典型样地观测值推求整个坡面特征值还一直缺乏科学依据。本研究发现,不同坡位样地林冠截留量与坡面均值均存在较大差异,且季节变化明显,表明利用一个典型样地或几个典型样地观测结果的平均值直接代表坡面特征值存在很大误差。基于本研究结果,林冠截留的坡位差异及季节变化主要是由叶面积指数的时空差异引起的,因此认为,可建立坡面林冠截留量与叶面积指数的数量关系及叶面积指数样地测定值向坡面均值转换的关系,利用叶面积指数的样地观测值实现林冠截留量坡面值的推算。从模拟结果来看,依此方法尺度上推得到的林冠截留量坡面均值精度较高,具有一定应用价值。值得指出的是,5 月和 10 月的坡面林冠截留

量计算值远低于实测值,这可能与研究坡面上的 LAI 变化特点有关,5 月,地形遮荫影响使得坡下部叶子发育明显滞后于坡上部;10 月,受温度和风速等影响,坡上部相比坡下部落叶较早。

4 结论

(1)林冠截留量存在明显的月份变化和坡位差异。5 月,林冠截留量和截留率的坡面均值分别为 8.7 mm 和 21.6%,变异系数为 0.15,其沿坡变化总体表现为随水平坡长增加逐渐降低;6 月、7 月和 8 月,林冠截留量坡面均值分别为 20.4、10.7、12.3 mm,林冠截留率坡面均值分别为 13.9%、14.3%、13.5%,变异系数分别为 0.30、0.30、0.16,其沿坡变化均为“坡中最大,坡上和坡下较小”,但 6 月坡下部林冠截留量和截留率明显小于坡上部;在 9 月和 10 月,林冠截留量坡面均值分别为 21.1 mm 和 6.9 mm,林冠截留率坡面均值分别为 13.5%和 17.7%,变异系数分别为 0.26 和 0.29,其沿坡变化均为随水平坡长增加逐渐升高。

(2)叶面积指数是影响林冠截留量时空变化的主导因素。各月林冠截留率的坡面变化均与叶面积指数呈显著正相关,表明叶面积指数的时空差异是导致林冠截留坡位差异及月份变化的主要因素。

(3)林冠截留量存在坡面尺度效应,且具季节差异。林冠截留量坡面尺度效应 5 月在坡段 0~425.1 m 内为-0.26 mm/100 m;6 月在 0~261.1 m 坡段内为+1.28 mm/100 m,在 261.1~425.1 m 坡段内为-1.78 mm/100 m;7 月在 0~267.6 m 坡段内为+0.92 mm/100 m,在 267.6~425.1 m 坡段内为-0.88 mm/100 m;8 月在 0~211.2 m 坡段内为+1.28 mm/100 m,在 211.2~425.1 m 坡段内为-0.34 mm/100 m;9 月和 10 月在 0~425.1 m 坡段内分别为+2.38 mm/100 m 和+0.81 mm/100 m。

(4)可实现坡面林冠截留量的精确推算。根据不同坡位样地的叶面积指数测定值与坡面均值的关系及林冠截留量与叶面积指数的关系,可由样地经尺度上推得到林冠截留量的坡面均值。

参考文献:

- [1] Peng H H, Zhao C Y, Feng Z D, et al. Canopy interception by a spruce forest in the upper reach of Heihe River basin, Northwestern China [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 28(4): 1734-1741.
- [2] Tsiko C T, Makurira H, Gerrits A M J, et al. Measuring forest floor and canopy interception in a savannah ecosystem[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2012, 47/48(3): 122-127.
- [3] Herbst M, Rosier P T W, McNeil D D, et al. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest [J]. *Agricultural and Forest*

- Meteorology, 2008, 148(11): 1655-1667.
- [4] Gerrits A M J, Pfister L, Savenije H H G. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(21): 3011-3025.
- [5] Wilderer P. Treatise on water science[M]. Vol. 2. Oxford: Academic Press, 2011: 89-101.
- [6] 陈书军, 陈存根, 曹田健, 等. 降雨特征及小气候对秦岭油松林降雨再分配的影响[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 513-521.
- [7] Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, et al. Fraction of incident rainfall within the canopy of a pure stand of *Pinus armandii* with revised Gash model in the Liupan Mountains of China[J]. Journal of Hydrology, 2010, 385(1/4): 44-50.
- [8] Shinohara Y, Komatsu H, Kuramoto K, et al. Characteristics of canopy interception loss in Moso bamboo forests of Japan[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(14): 2041-2047.
- [9] Saito T, Matsuda H, Komatsu M, et al. Forest canopy interception loss exceeds wet canopy evaporation in Japanese cypress (Hinoki) and Japanese cedar (Sugi) plantations[J]. Journal of Hydrology, 2013, 507(12): 287-299.
- [10] He Z B, Yang J J, Du J, et al. Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 188(3): 58-63.
- [11] 徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉, 等. 六盘山主要植被类型冠层截留特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2487-2493.
- [12] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees[J]. Journal of Hydrology, 1979, 42(3/4): 383-396.
- [13] 王云霓, 邓秀秀, 王彦辉, 等. 六盘山南坡华北落叶松人工林冠层 LAI 的坡面尺度效应[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3564-3571.
- [14] 邓秀秀, 王云霓, 王彦辉, 等. 华北落叶松人工林树高和胸径的坡位差异与坡面尺度效应: 以六盘山香水河小流域为例[J]. 中南林业科技大学学报(自然科学版), 2016, 36(5): 121-128.
- [15] 李振华. 六盘山叠叠沟典型植被蒸散及水文要素的坡面尺度效应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [16] 韩诚, 庄家尧, 张金池, 等. 长三角地区毛竹林冠截留效果的影响因素[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 92-96.
- [17] Fleischbein K, Wilcke W, Goller R, et al. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: Effects of canopy properties[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(7): 1355-1371.
- [18] 郭新亚, 张兴奇, 顾礼彬, 等. 坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 40-44.
- [19] Kume T, Tsuruta K, Komatsu H, et al. Differences in sap flux-based stand transpiration between upper and lower slope positions in a Japanese cypress plantation watershed[J]. Ecohydrology, 2016, 9(6): 1105-1116.
- [20] 张桐, 王彦辉, 王玉杰, 等. 黄土高原土石山区土壤密度的坡面变化: 以六盘山香水河小流域为例[J]. 林业科学研究, 2016, 29(4): 545-552.

(上接第 230 页)

- [22] Liu Y, Dang Z Q, Tian F P, et al. Soil organic carbon and inorganic carbon accumulation along a 30-year grassland restoration chronosequence in semi-arid regions (China)[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(1): 189-198.
- [23] Wang K B, Ren Z P, Deng L, et al. Profile distributions and controls of soil inorganic carbon along a 150-year natural vegetation restoration chronosequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(1): 193-202.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [25] Lorenz K, Lal R. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(2): 443-454.
- [26] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 50-55.
- [27] 张莉, 吴斌, 丁国栋, 等. 毛乌素沙地沙柳与柠条根系分布特征对比[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 158-161.
- [28] 张慧琴. 山杏、酸枣生态学特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [29] Gong X, Brueck H, Giese K M, et al. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(4): 483-493.
- [30] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
- [31] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 等. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5207-5216.
- [32] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. Plant and Soil, 1997, 191(1): 77-87.
- [33] 惠波, 李鹏, 张维, 等. 王茂沟流域淤地坝系土壤颗粒与有机碳分布特征研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 1-5.
- [34] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [35] 汤洁, 娄云, 李娜, 等. 冻融作用下盐碱水田土壤含水率和氮素对有机碳影响研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 620-623.