DOI: 10.5846/stxb201301050035
伍倩,闫文德,赵亮生,邓湘雯,宁晨,项文化.湖南会同杉木人工林林冠截留特征.生态学报,2016,36(13):4131-4140.
Wu Q, Yan W D, Zhao L S, Deng X W, Ning C, Xiang W H.Canopy interception characteristics of Chinese fir plantations in central south China.Acta Ecologica Sinica,2016,36(13):4131-4140.

湖南会同杉木人工林林冠截留特征

伍　倩[1],闫文德[1,2,3,*],赵亮生[4],邓湘雯[1,2,5],宁　晨[1,2,3],项文化[1,5]
1 中南林业科技大学, 长沙　410004
2 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙　410004
3 城市森林生态湖南省重点实验室, 长沙　410004
4 甘肃省白龙江林业管理局林业科学研究所, 兰州　730070
5 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站, 会同　418307

摘要:林冠对降水的截留是森林生态系统水分平衡的一个重要组成部分,在水分循环和水资源管理方面起着非常重要的作用。杉木是我国特有的速生商品材树种,研究杉木人工林各生长阶段的林冠截留,能更好的了解杉木各生长阶段的水循环过程以及涵养水源的能力。以湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站第Ⅲ集水区杉木人工林为研究对象,采用小集水区径流场综合试验法对 1983 年至 2007 年杉木人工林幼龄阶段、中龄阶段及近熟阶段 3 个不同生长阶段的林冠截留进行分析。结果表明:(1)杉木人工林不同生长阶段年均截留率分别为:幼龄阶段 26%、中龄阶段 27.86%和近熟阶段 29.47%,3 个阶段的截留率季节变化规律相似,但在降雨量较小的月份,近熟阶段的截留率明显高于幼龄阶段。(2)在雨量级小于 1.0 mm 时,3 个阶段林冠截留率都较高且无明显差别,均在 86%以上;在 1.0—2.0mm 雨量级时,3 个阶段截留率与雨量级小于 1.0 mm 时均大幅降低,但 3 个阶段截留率物显著差异,幼龄阶段 48.1%、中龄阶段 48.7%和近熟阶段 47.1%;在进入 2.0—4.0 mm 雨量级时,3 个阶段截留率差异较大,幼龄阶段 30.5%、中龄阶段 38.4%和近熟阶段 44.1%,近熟阶段的林冠能截留住更多的降雨;当降雨量大于 100 mm 时,3 个阶段林冠截留率又无明显差异截留率均低于 10%。(3)Fan 模型对各阶段杉木人工林林冠截留的模拟较为理想。

关键词:杉木人工林;降雨量;林冠截留;模型

Canopy interception characteristics of Chinese fir plantations in central south China

WU Qian[1], YAN Wende[1,2,3,*], ZHAO Liangsheng[4], DENG Xiangwen[1,2,5], NING Chen[1,2,3], XIANG Wenhua[1,5]
1 *Central South University of Forestry& Technology, Changsha* 410004,*China*
2 *State Key Laboratory of Ecological Applied Technology in Forest Area of South China, Changsha* 410004, *China*
3 *Hunan Provincial Key Laboratory of Forest Ecological City, Changsha* 410004,*China*
4 *Forest Research Institute, Bailongjiang Forestry Management Bureau, Lanzhou* 730070,*China*
5 *Huitong National Field Station for Scientific Observation & Experiment for Chinese Fir Ecosystem, Huitong* 418307, *China*

Abstract: Canopy rainfall interception is an important component of water balance in forest ecosystems and plays an important role in the water cycle and water resources management. Studying on rainfall interception across different aged stands of the specific fast-growing merchandise wood species-Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), can help us to better understand on water cycling and water resource conservation. In this study, canopy interception process was investigated using the small watershed comprehensive experimental technology at the third watershed (No.Ⅲ) in Huitong National Key

基金项目:国家科技支撑计划子课题(2015BAD07B050301);湖南省自然科学创新研究群体基金(湘基金委字[2013]7 号)
收稿日期:2013-01-04;　　**修订日期**:2016-05-04
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: csfuywd@ hotmail.com

Forest Ecosystem Research Station, Hunan. Forest rainfall, throughfall, and stemflow were monitored and the rate of rainfall interception was estimated in young, mid-age, and early-mature stands of Chinese fir plantations from 1983 to 2007. The mathematic Fan model was used to estimate the rainfall interception process. The results showed that (1) the average rainfall interception rates were 26.0% in young stands, 27.9% in mid-age stands, and 29.5% in early-mature stands; the seasonal variation of interception rates was similar in the three stages of Chinese fir plantations, but the interception rates were significantly higher in early-mature stands than young stands, especially within the months when rainfall amount was small. (2) When a rainfall event was amounted to less than 1.0 mm, there was no significant difference in rainfall interception rates for all three stands, which were all over 86%; when the amount of a rainfall event was 1.0—2.0 mm, interception rates considerably declined in the three growth stands. The interception rate was 48.1% in the young stands, 48.7% in the mid-age stands, and 47.1% in the early-mature stands and no significant differences were found in terms of interception rates among the three stands; when a rainfall event reached 2.0—4.0 mm, the interception rates significantly differed in the three stands, with the values of 30.5% in the young stand, 38.4% in the mid-age stand, and 44.1% in the early-mature stand; when a rainfall amount was greater than 100 mm, the interception rates were not significantly different between the three stands with less than 10% of interception rates. (3) The Fan model was suitable for interpreting rainfall interception of Chinese fir plantations in these studied regions.

Key Words: Chinese fir plantation; rainfall; canopy interception; model

林冠是森林与外界环境相互作用最直接和最活跃的界面层,通过遮荫、截留降水和蒸腾蒸发等作用参与森林生态系统水分循环[1],林冠截留作为水文过程中的重要一环,是降雨在到达地面过程中发生的第一次水量分配[2],它不仅影响降水的重新分配,还可以对降雨产生滞留作用及影响雨水中营养元素的输入等[3],是森林生态系统重要的生态水文功能之一,在森林生态系统文循环中占居重要地位[4]。森林林冠以其特有的结构,减少水分输入,影响地表径流,进而影响林地土壤的水分空间分布格局以及养分的循环和利用[5],对林冠水文效应的研究,有利于探明森林对降水的分配机制。

林冠截留研究已经有 100 多年的历史[6],国内外许多学者对林冠截留降水做了大量研究,掌握了大量的研究方法[2,7],获取了大量有关林冠截留量和截留率的实测数据[8-10]。据研究,在茂密的森林中,林冠对次降雨的截留量可达 10—20 mm,而林冠层的年截留量与年降雨量以及年内降雨的次数有关,其量可以达到年降水量的 15%—45%[11-12]。由于植被种类、密度、结构和气象条件的不同,截留量存在很大差异,一些地方的植被截留量可能占到降雨量的 50%[13]。关于林冠截留模型方面很多学者作了很多研究[14-20],一些学者对杉木人工林对降水的截留作用作了研究[21-22],但都是针对杉木人工林某一生长阶段对降水的截留作用,而要对杉木林不同生长阶段林冠截留特征进行研究则需要长期的定位观测,因此一直没有关于杉木人工林不同生长阶段对降雨截留的报道。本文以长时间的定位观测研究为基础,研究杉木人工林生态系统随着林分的生长,林冠层对大气降雨的截留动态变化,揭示各生长阶段杉木林林冠层对降水的截留作用,阐明不同生长阶段森林的水分分配机制影响及其生态学意义,为杉木人工林水文生态功能评估提供理论依据。

1 研究区基本情况

1.1 试验地概况

试验地设在湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站(会同生态站),该站位于湖南省西南部会同县境内,站内设有 8 个面积约 2 hm^2的试验小集水区,本研究选取第Ⅲ集水区作为研究对象,第Ⅲ集水区概况见表 1;第Ⅲ集水区在 1987 年年底皆伐第一代杉木人工林,1988 年整地营造第二代杉木人工林。根据南方杉木人工林的生长速度规律,按 5a 为 1 个龄级,结合龄级将林分分为不同生长阶段[5]。即 1988—1992 年为幼苗阶段;1993—1997 年为幼龄阶段;1998—2002 为中龄阶段;2003—2007 年为近熟阶段,各生长阶段林

分特征见表 2。林下代表植物主要有杜茎山 *Maesa japonia*(*thunb*)Moritzi、狗脊 *Rhizoma cibotti*、蕨类 *Pteridophyta* 等。

表 1　第Ⅲ集水区概况

Table 1　The general situation of the Ⅲ Watershed

位置 Location	面积/hm² Area	海拔/m Elevation	坡度/(°) Gradient	坡向 Aspect	地貌类型 Geomorphic type	土壤类型 Soil types	年均降水量 An average annual rainfall/mm	相对湿度/% Relative humidity	年均温/℃ Annual average temperature
26°50′N 109°45′E	1.9483	270—355	25	北	低山丘陵	山地黄壤	1312.6	80	17.4

表 2　第Ⅲ集水区杉木人工林不同生长阶段林分特征

Table 2　The characteristics of the different growth and development phases Chinese fir plantations

林分各生长阶段 Different growth and development phases of stand	密度/(株/hm²) Density	平均胸径/cm Averge diameter at breast height	平均树高/m Average tree height	郁闭度 Canopy density	冠幅/m Crown breadth	叶面积指数 Leaf area index	生物量/(t/hm²) Biomass
幼龄阶段(1993—1997) Young stands	2400	7.1	7.6	0.4	2	4	23.397
中龄阶段(1998—2002) Mid-aged stands	2350	13.4	11.9	0.65	3	6.2	63.84
近熟阶段(2003—2007) Pre-mature stands	2175	14.5	14.0	0.7	4.5	7	79.25

1.2　研究区降水分布概况

1.2.1　研究区降雨量

1983—2007 年年降雨量如图 1 所示,25a 年均降雨量 1312.6 mm。表 3 为集水区 1983—2007 年每月林外降水观测数据。从表 3 可以看出,25 年间每年 1—6 月降雨次数(2256 次)远大于 7—12 月(1353 次),占全年降雨次数的 62.51%;但是大的降雨量集中分布在 4—8 月份,这 5 个月的降雨次数占总降雨次数的44.22%,但是降雨量却占总降雨量的 62.02%,而其余各月的月平均降水量均不足 100 mm。另一方面 9—12 月,降雨次数和降雨量明显减少,属于相对干旱阶段;从 12 月到次年 3 月则进入降雨事件频发但降水量不高的阶段。总之,研究区年降雨量分布不均匀,年降水量主要依赖 4—8 月降雨。

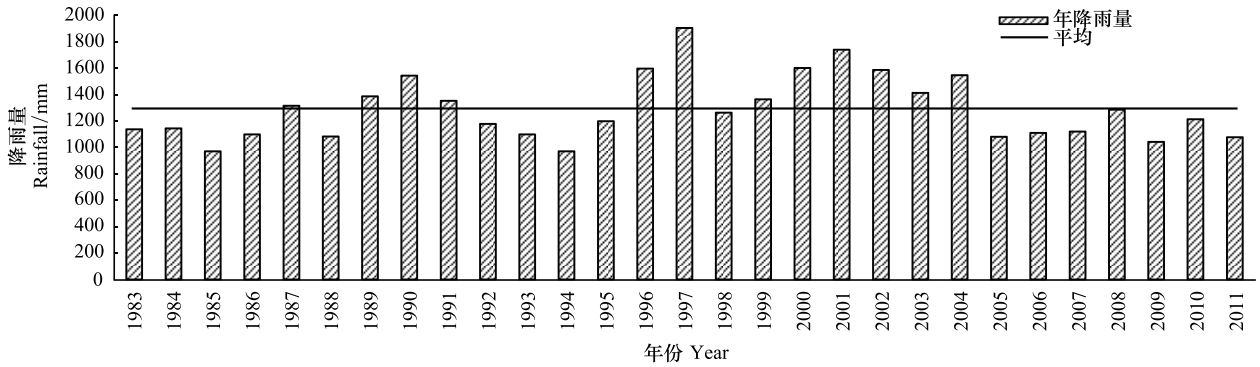

图 1　第Ⅲ集水区各年降雨量分布(1982—2007 年)

Fig.1　Annual rainfall at the Ⅲ Watershed (1982—2007)

1.2.2　研究区降雨强度

表 4 为 1983—2007 年间研究区降雨按降雨强度统计结果,研究区一次性降雨强度在 0.5—5.0 mm/d 的日降水量小于 10 mm/d 的降雨(小雨)总次数为 2656 次,占总降雨次数的 73.59%,小雨的总降雨量为 7660.0

mm/d,占总降雨量的23.34%。在3609次降水中,出现在10—25 mm/d以及25—50 mm/d的中雨和大雨的降雨量,分别占总降雨量的30.76%和28.69%,但其降雨次数分别只占17.21%和7.09%;降雨量大于50 mm/d的暴雨和大于100 mm/d大暴雨等高强度的降雨次数只有76次,占总降雨次数的2.11%,它们的总降雨量却高达5645.0mm,占总降雨量的17.20%。因此可以看出,在该研究区域内,小雨的降水次数虽然多,但是中雨、大雨和暴雨的降雨量却占了总降雨量主要的一部分。

表3 第Ⅲ集水区林外降水特征分布(按月统计,1983—2007年)

Table 3 The characteristics of rainfall of the Ⅲ watershed according to month (1983—2007)

月份 Month	月均降水量/mm The average monthly precipitation	月均降水量/% The average monthly precipitation percentage	降雨次数 Times of rainfall	降雨次数/% Rainfall frequency percentage	月降雨标准偏差 The standard deviation on rainfall	变异系数 Cv Coefficient of variation
1	67.34	5.13	340	9.42	36.72	0.545
2	84.25	6.42	375	10.39	40.57	0.482
3	98.83	7.53	412	11.42	37.44	0.379
4	140.56	10.71	400	11.08	51.86	0.369
5	197.07	15.01	389	10.78	67.47	0.342
6	213.34	16.25	340	9.42	102.64	0.481
7	145.26	11.07	243	6.73	121.64	0.837
8	117.93	8.98	224	6.21	71.56	0.607
9	64.83	4.94	186	5.15	45.47	0.701
10	86.22	6.57	266	7.37	66.97	0.777
11	61.03	4.65	200	5.54	34.82	0.570
12	35.98	2.74	234	6.48	24.40	0.678

表4 第Ⅲ集水区林外降水特征分布(按降雨强度统计,1983—2007年)

Table 4 The characteristics of rainfall outside the Ⅲ watershed according to its intensity (1983—2007)

降雨强度/(mm/d) Rainfall intensity	0—0.5	0.5—5.0	5—10	10—25	25—50	50—100	>100	合计 Total
降雨次数 Times of rainfall	501	1627	528	621	256	67	9	3609
降雨次数/% Rainfall frequency percentage	13.88	45.08	14.63	17.21	7.09	1.86	0.25	100
降雨量/mm Rainfall	157.2	3514.2	3988.6	10095.3	9415.3	4538.6	1106.4	32815.6
降雨量/% Rainfall percentage	0.48	10.71	12.15	30.76	28.69	13.83	3.37	100

2 研究方法

本研究选取第Ⅲ集水区杉木人工林为研究对象,采用小集水区径流场综合试验法[23],从1995年林分接近郁闭开始记录林内穿透水。

第Ⅲ集水区降水数据(P)主要收集装置是气象梯度观测铁塔顶上(22 m高)和距离集水区约200 m的林外空旷地安装遥测雨量计,该装置可以连续测定降水量和降水强度。同时,在相同地点利用普通雨量计测定降水量作为对照。分别在第Ⅲ集水区的山洼、山麓、山坡3个部位设置一个18—20m^{2}的穿透水承接装置,用SW-40型日记水位计测定穿透水的量。

穿透水量(P_t)按下列公式换算成mm:

$$P_t = \frac{\Delta t \times 0.4332035 \times \overline{H}^{1.789297}}{A} \tag{1}$$

式中,P_t 为穿透雨量(mm),Δt 为时距(min),H 为平均水头高(cm),A 为穿透水承接装置的水平面积(m^2)。

树干径流 P_s(mm)采用聚乙烯塑料管蛇形缠绕于树干,并用沥青封好、在适当的位置打孔,将水导入塑料管中,塑料管的下端接入一个特制的盛水溶器中。根据林分的株数密度和林分的径阶分布规律,将样木的树干实测茎流量换算成单位面积的流量(mm)。

截留量 P_I 根据水量平衡方程估算得出,按下列公式计算截留量 P_I(mm):

$$P_I = P - (P_t + P_s) \tag{2}$$

式中,P 为降雨量(mm),P_t 为穿透水(mm),P_s 为树干径流(mm)。

3　结果与分析

3.1　不同雨量级下林冠截留特征

由于杉木人工林生态系统的幼龄阶段、中龄阶段和近熟林阶段的冠层结构相差很大,因此,对于林冠截留降雨的研究应根据不同年龄阶段分别进行研究,将各阶段的一次性降水的实测数据按不同年龄阶段及不同雨量级统计成表 5。第Ⅲ集水区的第 2 代杉木林是 1988 年春造林,林冠截留是从 1995 年 5 月 1 号开始观测的,所以表 5 中没有 1995 年前的数据。从表中可看出,3 个不同林龄阶段的杉木人工林的林冠截留量和截留率在不同的雨量级下发生变化。在降雨量<1.0 mm 时,3 个阶段杉木林截留率随降雨量的增加而减小,但是减小的幅度有所不同,一次性降水在 0.5 mm 以下时,3 个阶段杉木林能基本截留全部降水,截留率为 98%以上;在中龄和近熟阶段,0.7—1.0 mm 时的截留率都能在 90%以上,但是在幼龄阶段,却下降到了 86%。在 1.0—2.0 mm阶段时,各阶段杉木林截留率均有一个巨大的下降。值得注意的是,在雨量级为 1.0—2.0 mm 阶段时,幼龄阶段、中龄阶段及近熟阶段的截留率分别是 48.1%、48.7%和 47.1%,各阶段截留率没有显著差异,而到 2.0—4.0 mm 阶段时,幼龄阶段、中龄阶段和近熟阶段截留率为 30.52%、38.4%和 44.1%,与 1.0—2.0 mm 时林冠截留率差值达:17.58%、10.3%和 3%,此时各阶段的的林冠截留率就有了很大的差别,这说明对于在降雨量小时,各林龄阶段林冠截留率没有太大的差别,但是在降雨量大时,各林龄阶段林冠截留发生很大的改变,近熟阶段的杉木林林冠能截留住更多的降雨。

表 5　不同林龄阶段不同雨量级下降雨分配

Table 5　The distribution of theprecipitation of different growth phases

林分生长阶段 Growth phases	雨量级 Rainfall class /(mm/d)	样本数 Sample	平均降雨量 Rainfall/mm	平均截留量 Inter./mm	截留率 Inter. Rate/%
幼龄阶段	0—0.5	74	0.34	0.338	99.41176
Young stands	0.5—0.7	40	0.644	0.624	96.89441
	0.7—1.0	31	0.876	0.757	86.41553
	1.0—2.0	23	1.559	0.75	48.10776
	2.0—4.0	19	2.971	0.907	30.52844
	4.0—6.0	14	5.179	1.391	26.85847
	6.0—10.0	8	7.756	1.955	25.20629
	10.0—15.0	12	12.854	3.983	30.98646
	15.0—20.0	8	17.931	5.27	29.39044
	20.0—30.0	7	25.264	8.066	31.92685
	30.0—40.0	5	33.42	10.222	30.58648
	40.0—60.0	3	48.017	10.973	22.85232
	60.0—100.0	2	67	11.445	17.08209
	>100.0	1	100.4	12.068	12.01992
合计 Total		247	1325.031	408.441	30.82501
中龄阶段	0—0.5	239	0.302	0.297	98.34437
Mid-aged stands	0.5—0.7	67	0.632	0.584	92.40506

续表

林分生长阶段 Growth phases	雨量级 Rainfall class /(mm/d)	样本数 Sample	平均降雨量 Rainfall/mm	平均截留量 Inter./mm	截留率 Inter. Rate/%
	0.7—1.0	50	0.881	0.805	91.37344
	1.0—2.0	20	1.638	0.797	48.6569
	2.0—4.0	34	2.776	1.068	38.47262
	4.0—6.0	25	4.938	1.937	39.22641
	6.0—10.0	34	7.81	2.671	34.19974
	10.0—15.0	22	11.498	3.968	34.51035
	15.0—20.0	18	17.381	5.899	33.93936
	20.0—30.0	12	23.933	8.235	34.40856
	30.0—40.0	7	32.257	10.942	33.92132
	40.0—60.0	7	46.243	11.149	24.10959
	60.0—100.0	1	67.5	11.945	17.6963
	>100.0	1	144.8	12.246	8.457182
合计 Total		537	2289.516	812.978	35.50873
近熟阶段	0—0.5	117	0.336	0.326	97.02381
Pre-mature stands	0.5—0.7	56	0.653	0.633	96.93721
	0.7—1.0	53	0.868	0.81	93.31797
	1.0—2.0	12	1.492	0.712	47.72118
	2.0—4.0	18	2.669	1.177	44.09891
	4.0—6.0	10	4.815	1.805	37.48702
	6.0—10.0	18	8.097	3.207	39.60726
	10.0—15.0	22	12.557	3.069	24.44055
	15.0—20.0	8	16.981	5.824	34.29716
	20.0—30.0	7	24.407	8.006	32.80206
	30.0—40.0	3	34.9	10.985	31.47564
	40.0—60.0	3	48.567	11.616	23.91747
	60.0—100.0	1	65.7	11.775	17.92237
	>100.0	2	122.725	11.923	9.715217
合计 Total		330	1526.228	495.602	32.47234

此外,近熟龄阶段的杉木人工林生态系统中,当降雨量在 4.8 mm 时,截留水量 1.8 mm,截留率为 37.5%;雨量增加到 24.4 mm,截留量增加到 8.0 mm,截留率反而减少到 32.8%,一次降水量在 40 mm 时,林冠截留雨量达到了 11.6 mm,当降水量增加到 65.7 mm,截留量只增加到 11.7 mm,截留率从 31.5%下降到了 23.9%,截留量随降水量增大而增大,但它们不是呈线形相关,当截留量达到饱和时,随着降雨量的增加,截留量不会再有很大的变化,而截留率却是随着降雨量的增加而减小。林冠截留作用不是无限的,林冠对降水的截留量有一个阈值,这个阈值将随着林分的年龄不同而改变,一般林分刚好完全郁闭时,其叶面积指数达到最大值,此时的林分截留量最大。根据推导和表 5 中 60 mm 以上雨量级的截留量结果表明,阈值在 11—12 mm 之间,随着降雨强度的进一步增大,林冠截留的能力逐渐降低。

3.2 杉木林林分各生长阶段林冠截留作用

从表 6 可以看出,杉木人工林不同生长阶段林冠对降水输入再分配的月分布规律相近但又存在差异,林分各生长阶段穿透水都会随着降雨量的增加而增加;同时随着年龄的增加,林冠截留能力加强,所以各生长阶段林分年平均林冠截留率会有差异。

林分不同生长阶段年均截留率分别为:幼龄阶段(27%)<中龄阶段(27.86%)<近熟阶段(29.47%)。分析林分生长各阶段月截留率,可以看出,处于不同生长阶段的杉木林林分截留率季节变化规律相似,即 1—3 月份降雨量较少,截留率较高,从 4 月份开始进入雨季,随着降雨量和降雨强度的增加,截留率开始减小,这一状

况一直持会续到 8 月,随着雨季的结束截留率也会反弹;而进入 9 月份后降雨总量和降雨天数相对减少,两次降雨间隔期变长,冠层一直处于不饱和状态,林冠截留率会增加;并且在 10 月份降雨量又有一个反弹的现象,所以 9、10、11 3 个月份的截留率变化幅度非常大,一直到 12 月份,截留率才趋于稳定。一年中,截留率的最小值一般会出现在 5—7 月,这段时间也是大雨和暴雨频发的时期。总之,4—8 月,由于月平均降雨量增加,降雨截留量也增加,但是截留率处于较低水平;而在其他月份,林冠截留损失量较少,截留率比较高。在降雨量较少的几个月份(1—3 月及 9—12 月),随着林分的生长,林冠的截留率增大的比较明显,比如幼龄阶段 1 月份平均截留率为 26.5%,到中龄阶段 1 月份平均截留率增加到 30.70%,近熟阶段增加到 33.10%;但是在降雨量较高的月份(4—8 月),林分各生长阶段截留率的差异不大,在月降雨量在 240 mm 以上时,林分各生长阶段截留率均不到 25%。对比林分不同生长阶段各月的截留率,也可以看出随林分的生长截留率也在增大。

表 6　第Ⅲ集水区林分各生长阶段林冠对降水输入再分配情况

Table 6　The input and precipitation distribution rule by canopy for different growth and development phases of Chinese fir Plantations at the Ⅲ Watershed

林分生长阶段 Different growth and development phases	项目 Item	月份 Month												合计 Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
幼龄阶段	降雨量/mm	76.77	109.70	127.57	150.80	182.97	194.27	297.43	79.60	84.93	138.67	78.47	46.07	1567.23
Young stands	截留量/mm	20.27	26.07	37.73	41.37	50.20	52.83	68.47	26.50	22.73	39.37	22.90	14.73	423.17
	截留率/%	26.50	24.15	28.09	29.01	27.30	27.74	23.90	33.66	26.37	31.15	29.78	37.89	26.00
中龄阶段	降雨量/mm	64.92	74.4	107.42	168.46	265.12	262.9	150.02	151.16	52	116.78	63.26	35.12	1511.56
Mid-aged stands	截留量/mm	19.93	26.32	30.91	44.86	64.57	68.61	41.36	47.51	14.00	31.15	19.57	12.39	421.16
	截留率/%	30.70	35.37	28.77	26.63	24.35	26.10	27.57	31.43	26.92	26.68	30.93	35.28	27.86
近熟阶段	降雨量/mm	73.72	90.84	89.32	158.34	169.06	240.44	145.58	114.64	53.2	30.16	49.96	39.1	1254.36
Pre-mature stands	截留量/mm	19.40	24.77	23.79	41.20	47.11	47.40	31.88	28.33	13.13	8.38	14.08	10.25	309.72
	截留率/%	33.10	32.77	32.23	29.18	30.82	21.79	25.34	29.08	34.08	44.36	38.19	39.00	29.47

总体而言,杉木人工林不同生长发育阶段林冠对降水输入的再分配情况存在一定差异,而这些差异可能是因为林分自身因素改变造成的,如林分结构变化,随着林分的生长发育,林冠层的结构特征不断变化,速生阶段随着林冠层冠幅和冠层厚度的增加,林冠层开始发挥截留作用,当进入中龄阶段后,林冠层进一步郁闭,所以相比幼龄阶段而言,中龄阶段林冠对降水输入的再分配作用更为明显,当林分生长到近熟阶段后,林冠层结构达到稳定,对降水输入的再分配过程基本上也趋于稳定。

3.3　Fan 模型对杉木人工林林冠截留的模拟

3.3.1　Fan 模型参数确定

林冠截留模型是模拟和估算林冠截留量的重要方法之一,国内外学者已在不同地区、不同林分类型建立了许多林冠截留模型。范世香模型(简称 Fan 模型)[12]推导逻辑性较强,参数较少物理意义明确,应用简便,限制因素少,特别是不受气象因子限制。Fan 模型在具体应用过程中,根据林分特征,将林分划分为完全郁闭和不完全郁闭两种情况,本研究中属于林分不完全郁闭情况,因此以下计算公式:

采用当 $P<H$ 时,

$$I = \alpha W\left[1 - \left(1 - \frac{P}{H}\right)^{\beta+1}\right] \tag{3}$$

当 $P \geqslant H$ 时,

$$I = \alpha W \tag{4}$$

式中,P 为降雨量,H 为冠层最厚密处的饱和截留量,W 为林分最大截留能力,α 为郁闭度,β 为综合参数。模型推导过程参见参考文献[12]。

取 3 阶段的最大截留量对应的降雨量为冠层最厚密处的饱和截留量 H,所对应的数值为冠层最大截留能

力 I,3 个阶段的郁闭度分布为:0.4,0.65,0.7,通过公式(4)计算 W。所以,3 个阶段的林冠截留能力模型分别为:

幼龄阶段

$$I=12.068\left[1-\left(1-\frac{P}{100.4}\right)^{3.328}\right] \quad P<100.4$$

$$I=12.068 \quad P\geqslant 100.4$$

中龄阶段

$$I=12.246\left[1-\left(1-\frac{P}{144.8}\right)^{7.686}\right] \quad P<144.8$$

$$I=12.246 \quad P\geqslant 144.8$$

近熟阶段

$$I=11.923\left[1-\left(1-\frac{P}{122.725}\right)^{7.205}\right] \quad P<122.7$$

$$I=10.88 \quad P\geqslant 122.7$$

3.3.2 模拟结果

表 7 为各阶段的实测值与模拟结果,从实测林冠截留与模拟值比较来看,Fan 模型对各阶段杉木人工林林冠截留的模拟较为理想。

表 7 不同雨量级下 Fan 模型模拟值与实际值比较

Table 7 The Fan model simulation values under different rainfall level compared with the actual value

雨量级 Rainfall class/(mm/d)	幼龄阶段 Young stands		中龄阶段 Mid-aged stands		近熟阶段 Pre-mature stands	
	实测值 Observed/mm	模拟值 Calculated/mm	实测值 Observed/mm	模拟值 Calculated/mm	实测值 Observed/mm	模拟值 Calculated/mm
0—0.5	0.338	0.135472	0.297	0.194942	0.326	0.197909
0.5—0.7	0.624	0.255697	0.584	0.404867	0.633	0.382026
0.7—1.0	0.757	0.346875	0.805	0.561152	0.81	0.505479
1.0—2.0	0.75	0.612441	0.797	1.025319	0.712	0.85736
2.0—4.0	0.907	1.148067	1.068	1.692915	1.177	1.495722
4.0—6.0	1.391	1.950154	1.937	2.866596	1.805	2.578302
6.0—10.0	1.955	2.833073	2.671	4.249173	3.207	4.04658
10.0—15.0	3.983	4.41859	3.968	5.762318	3.069	5.720907
15.0—20.0	5.27	5.797805	5.899	7.662924	5.824	7.069355
20.0—30.0	8.066	7.468741	8.235	9.19147	8.006	8.769593
30.0—40.0	10.222	8.930303	10.942	10.48093	10.985	10.28831
40.0—60.0	10.973	10.68338	11.149	11.60948	11.616	11.29509
60.0—100.0	11.445	11.75833	11.945	12.14763	11.775	11.7701
>100.0	12.068	12.068	12.246	12.246	11.923	11.92298
总计	68.749	68.40693	72.543	80.09572	71.868	76.89971

4 讨论

研究结果表明,杉木人工林林分不同生长阶段对降雨的截留存在差异,特别是幼龄阶段和近熟阶段的差异尤为明显。一些研究结果表明,不同的林冠类型的截留量存在显著差异,主要是林分年龄差异造成的[24-25]。谢刚等[26]在对不同林龄香椿对林冠截留雨水的影响中也发现,随着林龄的增长,林内穿透水量减小。不同龄级之间降水截留的差异,主要是因为各龄级冠层结构不同引起的;幼龄林处于林分的幼龄阶段,林分的郁闭度只有 0.4,林冠层没有充分郁闭,降雨会通过这些空隙直接到达林地,有研究报道,林冠层的持水能力与叶面积指数有关,持水能力随叶面积指数的增大而增大[27],在该阶段林分的叶面积指数仅为 4,所以这个阶段截留量相对较低;当林分生长到到中龄阶段,林分随着枝条伸展林冠郁闭度达到了 0.65,叶面积指数达到 6.2,此时林冠的持水能力增强,林冠的截留量也随之增强;林分进入近熟阶段时,林分的郁闭度达到 0.7,叶

面积指数为 7,林冠的截留量会进一步增多。随着林分不同演替阶段,林冠郁闭度和叶面积的改变,截留量会增加,穿透水则会减少,与彭焕华等[28]对祁连山青海云杉林冠层持水能力的研究结果相似,林外降雨量和林冠穿透雨量之间呈显著的线性关系。

杉木人工林林冠截留率与总降雨量呈负相关关系:低降雨量时,会有较高的林冠截留率。这与以前的研究结论相似[25,29-31]。在本研究中,当降雨量在 0.5 mm 时,林分各生长阶段截留率均为 100%;而总降雨量在 130 mm 时,幼龄阶段林分截留率仅为 5%,中龄阶段及近熟阶段林分截留率为 9%。有研究发现[31]阵雨时随降雨量增大,截留率减少的变化非常显著, 降雨量在 5 mm 以下时,截留率为 80%,而降雨量增加到 60 mm 以上时截留率仅为 20%。此时截留率的减少的主要是林冠饱和截留容量已经达到上限。在小雨事件时,降雨通过凝聚力和表面张力被截留在冠层,而截留量达不到林冠饱和截留容量时,林内就会出现穿透水,这也是为什么小雨时会出现相对较高的截留率;但在大雨时,林冠饱和截留容量很快就被暴雨饱和,冠层只能截持很小比例的降雨量,大部分的降雨几乎都会通过穿透水和树干径流形式到达地面,所以大暴雨时林冠截留率相对较低,这也说明降雨量是影响降雨再分配的关键因子[32]。值得注意的是,截留率对于不同的降雨量或者暴雨不同阶段有不同的响应。在小雨或暴雨初期时,冠层表面湿度随着截留降雨量的增加迅速变化,截留率也迅速变化;在降大雨或者林冠截留容量达到饱和后,降雨量持续增加,冠层湿度还是保持在一个恒定的状态,林冠截留量也不会增加,而截留率也随之变小。所以,可以说冠层结构式是小雨时控制截留量的主导因素,而在大雨时降雨雨情在截留过程中起决定性作用。从降雨强度与林冠截留的关系上来看,随着降雨强度的增强,林冠截留量相对增强,截留率降低,近熟林比幼龄林暴雨的情况下,能够截留更多的降水,这说明近熟林在暴雨气候条件下,能够更好地发挥其林冠的截留作用,相对地减少林内降雨。

杉木人工林截留量的季节变化格局主受当地气候条件及降雨类型的影响。在研究区,绝大多数降雨量集中分布在 4—8 月,并且暴雨频发,冠层表面经常保持湿润,因此,在这段时期截留降率相对较低,幼龄林阶段为 20.2%,中林龄为 23.5%,26.5%;而在 9—11 月,降雨总量和降雨天数相对减少,林冠层很容易在两次降雨间隔期内变得干燥,冠层一直处于不饱和状态,林冠截留降水量增加,截留率增加,此时 3 个阶段的截留率为 27.5%,28.1%和 30.1%;从 12 月到次年 3 月,降雨主要以小雨为主,截留量相对较高,这主要是因为林冠截留容量达不到饱和。罗忠[33]2009 年对 23a 生的枫香林林冠截留进行研究,其研究结果小于本研究中杉木人工林近熟林,这主要是由于选择的枫香林,虽然林龄 23a,与本研究中近熟阶段一致,但其林分密度,胸径,郁闭度都小于本研究中近熟阶段的杉木人工林,因此其林冠截留能力也小于近熟阶段的杉木人工林。

从本研究结果中可得知杉木人工林幼龄阶段截留能力最小,而近熟阶段截留能力最大,根据邓湘雯[5]对同时期杉木人工林径流的研究表明,在杉木的幼龄阶段,地表径流系数为 1.98,中龄阶段为 2.22,近熟阶段则为 0.93,在杉木的幼龄阶段,这并不能说采伐森林或幼林具有很强的调控能力,而是人为干扰增大了土壤的渗透性能,使那些本来可以形成地表径流的水量渗入到土壤中,从地下径流系数上来看,近熟阶段(16.00)<中龄阶段(23.37)<幼龄阶段(26.52),近熟阶段的地表径流和地下径流系数明显降低,说明杉木人工林生态系统对径流的调配能力增强,这首先与近熟阶段能截留更多的降雨,减少穿透水的形成,其次与近熟阶段形成的较厚的枯落物层有关,此外,在近熟阶段杉木林蒸腾作用增大,近成熟林分的蒸腾作用将消耗大量的水分,加速了土壤水流动速率,促进了林分水循环过程。

5　结论

(1)随着杉木人工林林分生长发育,林分降雨截留量增大,林分各生长阶段林冠截留率排序为近熟阶段(29.47%)>中龄阶段(27.86%)>幼龄阶段(26%)。(2)不同生长阶段的杉木人工林的林冠截留量随着降雨量的增大首先呈现上升趋势,当到了稳定阶段,不再随雨量的增加或增加极小。截留率与降雨量有很大的关系,在相同降雨量的情况下,近熟林的截留率>中龄林的截留率>幼龄林的截留率。(3)降雨强度对林冠截留有较大影响,在小雨和中雨情况下,截留率呈现出近熟阶段>中龄阶段>幼龄阶段;在大、暴雨的情况下近熟阶

段和中龄阶段截留率依然明显大于幼龄阶段,杉木人工林各生长阶段林冠截留作用不同,在针对杉木人工林保持水土作用经营方针时,应考虑林分各生长阶段林冠截留的差异。(4)Fan 模型对杉木林各阶段林冠截留模拟效果较好,可运用于会同杉木林生态系统。(5)近熟杉木人工林涵养水源功能更强。

参考文献(References):

[1] 田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 彭守璋, 彭焕华. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素. 生态学报, 2012, 32(4): 1066-1076.

[2] 王爱娟, 章文波. 林冠截留降雨研究综述. 水土保持研究, 2009, 16(4): 55-59.

[3] 康文星, 邓湘雯, 赵仲辉. 林冠截留对杉木人工林生态系统物质循环的影响. 林业科学, 2006, 42(12): 1-5.

[4] 周光益. 中国热带森林水文生态功能. 生态学杂志, 1997, 16(5): 47-50, 56-56.

[5] 邓湘雯. 不同年龄阶段会同杉木林水文学过程定位研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.

[6] New M, Todd M, Hulme M, Jones P. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. International Journal of Climatology, 2001, 21(15): 1889-1922.

[7] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(Ⅰ). 西北林学院学报, 2000, 15(3): 1-7.

[8] 董世仁, 郭景唐, 满荣洲. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留. 北京林业大学学报, 1987, 9(1): 58-68.

[9] 杨茂瑞. 亚热带杉木, 马尾松人工林的林内降雨, 林冠截留和树干茎流. 林业科学研究, 1992, 5(2): 158-162.

[10] Zhang Z S, Li X R, Dong X J, Ji X H, He M Z, Tan H J. Rainfall interception by sand-stabilizing shrubs related to crown structure. Sciences in Cold and Arid Regions, 2009, 1(2): 107-119.

[11] Dunkerley D L, Booth T L. Plant canopy interception of rainfall and its significance in a banded landscape, arid western New South Wales, Australia. Water Resources Research, 1999, 35(5): 1581-1586.

[12] 范世香, 高雁, 程银才, 白清俊. 林冠对降雨截留能力的研究. 地理科学, 2007, 27(2): 200-204.

[13] Bulletin. International symposium on forest hydrology. International Association of Scientific Hydrology. 1966, 11(1): 161-170.

[14] 刘曙光. 林冠截留模型. 林业科学, 1992, 28(5): 445-449.

[15] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1979, 105(443): 43-55.

[16] 刘家冈, 万国良, 张学培, 王本楠. 林冠对降雨截留的半理论模型. 林业科学, 2000, 36(2): 2-5.

[17] 刘蕾, 刘家冈. 非均匀林冠降雨截留模型. 林业科学, 2007, 43(3): 8-14.

[18] 王彦辉, 于澎涛, 徐德应, 赵茂盛. 林冠截留降雨模型转化和参数规律的初步研究. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 25-30.

[19] 刘贤赵, 康绍忠. 林冠截留模型评述. 西北林学院学报, 1998, 13(1): 26-30.

[20] 裴铁璠,郑远长. 林冠分配降雨过程模拟与模型 Ⅰ. 常雨强下穿透降雨、树干径流和林冠截留模型. 林业科学, 1996, 32(1): 1-10.

[21] 杜紫贤, 韩永刚, 谢锦升, 郭剑芬, 张静. 木荷与杉木人工林林冠截留初步探讨. 亚热带水土保持, 2007, 19(2): 5-9.

[22] 樊后保. 杉木人工林对降水的截留作用. 福建林学院学报, 1998, 18(1): 92-95.

[23] 潘维俦, 田大伦, 文仕知, 廖家翔, 康文星, 雷志星. 森林生态系统物质循环研究中的生物地球化学方法和实验技术. 中南林学院学报, 1984, 4(1): 18-28, 101-102.

[24] 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.

[25] Hall R L. Interception loss as a function of rainfall and forest types: stochastic modelling for tropical canopies revisited. Journal of Hydrology, 2003, 280(1/4): 1-12.

[26] 谢刚, 夏玉芳, 郗静, 李涛. 不同林龄香椿对林冠截留雨水的影响. 贵州农业科学, 2013, 41(1): 153-157.

[27] 吕瑜良, 刘世荣, 孙鹏森, 刘兴良, 张瑞蒲. 川西亚高山不同暗针叶林群落类型的冠层降水截留特征. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2398-2405.

[28] 彭焕华, 赵传燕, 许仲林, 彭守璋, 王瑶.祁连山青海云杉林冠层持水能力. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2233-2239.

[29] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. Hydrological Processes, 2000, 14(16-17): 2903-2920.

[30] Toba T, Ohta T. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests. Journal of Hydrology, 2005, 313(3/4): 208-220.

[31] 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.

[32] 刘春霞, 王玉杰, 王云琦, 王冉, 胡波. 西南亚热带天然混交林林冠截留效应. 东北林业大学学报, 2013, 41(7): 9-14.

[33] 罗忠, 文仕知. 枫香人工林林冠截留对降水水量输入的影响. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(1): 41-44.