

桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应

时忠杰^{1,2}, 张宁南¹, 何常清^{3,*}, 邱志军¹, 徐大平¹, 高吉喜², 胡哲森⁴

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 2. 中国环境科学研究院生态环境研究所, 北京 100012;

3. 江苏省城市规划设计研究院, 南京 210036; 4. 福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘要: 水文功能是森林生态功能的重要方面, 为了解桉树人工林的水文生态效应, 采用定位研究并结合室内测定的实验方法, 研究了广东肇庆桉树人工林冠层降雨再分配、凋落物持水能力、土壤水分物理及蓄水能力。结果表明, 研究期间 (2006-05—2007-05) 的大气降雨量为 2016.7 mm, 通过林冠层后降雨被重新分配, 穿透降雨量、树干茎流量和林冠截留量分别占总降雨量的 85.70%、3.62% 和 10.68%。产生树干茎流的临界降雨量为 3.93 mm, 穿透雨量、树干茎流量与林外降雨量均呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 林冠截留率与降雨量呈显著的负相关 ($P < 0.05$), 降雨量超过 20 mm 后, 林冠截留率基本保持稳定。本研究桉树人工林的凋落物最大持水量为 4.27 mm, 凋落物中树叶的最大持水量最大, 为 2.54 mm。0—100 cm 土层的最大蓄水量为 470.06 mm, 其中非毛管蓄水量为 98.22 mm, 土壤总孔隙度和非毛管孔隙度随土壤深度增加呈递减趋势; 0—10 cm 土壤层的初渗速率和稳渗速率分别为 $25.03 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $8.83 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 且随土壤深度增加而逐渐减小。

关键词: 桉树人工林; 水文生态功能; 冠层截留; 凋落物; 渗透性

Eco-hydrological effect of the canopy, litter and soil of a eucalyptus plantation in South China

SHI Zhongjie^{1,2}, ZHANG Ningnan¹, HE Changqing^{3,*}, QIU Zhijun¹, XU Daping¹, GAO Jixi², HU Zhesen⁴

1 Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

2 Research Institute of Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3 Jiangsu Institute of Urban Planning and Design, Nanjing 210036, China

4 College of Forestry, Fujian University of Agriculture and Forestry, Fuzhou 350002, China

Abstract: The hydrological function is one of the important ecological functions of forest. To understand the eco-hydrological effects of eucalyptus plantation, we studied the canopy interception, rainfall redistribution and water-retaining capacity of litter and soil based on fixed field observation and measurement of laboratory in Gaoyao, Zhaoqing City, Guangdong Province, China. The results indicate that among the cumulative gross rainfall (2016.7 mm) generated during the period from Apr. 2006 to Apr. 2007, throughfall, stemflow and canopy interception account for 85.70% (1728.4 mm), 3.62% (72.9 mm), and 10.68% (215.4 mm), respectively. The stemflow can be produced only when the precipitation is more than 3.93 mm. The throughfall and stemflow are distinctly positive related to the precipitation ($P < 0.01$) and the values of the interception ratio to gross rainfall have a distinctly negative relationship to the precipitation ($P < 0.05$). The value of interception ratio to gross rainfall keeps generally steady when the precipitation is more than 20 mm. The results also show that the water-capacity of litter is 4.27 mm, and among the total 4.27 mm, the capacity from the part of leaves (2.54 mm) is the best among all kinds of components of litter. The maximum water-capacity of the soil layer from 0 to 100 cm depth is 470.06 mm, and the non-capillary water-capacity accounts for 20.90% (98.22 mm) of the total. Both of the total and non-capillary porosities show a decreasing trend with the increasing of soil depth. The initial and steady infiltration rates in the surface (0—10 cm) are $25.03 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ and $8.83 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30700640); 国家科技部社会公益研究专项资助项目 (2003DB3J116); 广东省自然科学基金资助项目 (0113931)

收稿日期: 2009-04-20; 修订日期: 2009-06-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hchqing@126.com

respectively, and also decrease with the increasing of soil depth.

Key Words: eucalyptus plantation; eco-hydrological effect; canopy interception; litter;infiltration

森林与水的关系是生态水文学研究的核心问题之一^[1],大气降水首先以穿透降雨、树干茎流、冠层截留、蒸散等形式重新分配,穿越冠层的水分被凋落物截持,然后渗透进入土壤,完成由大气到土壤的转化过程^[2]。我国学者已从林冠降水再分配^[3-4]、凋落物及苔藓层截持与持水能力^[5-6]、土壤水文物理性质^[7-8]等方面对森林水文生态效益进行了大量研究,取得较多成果。桉树(*Eucalyptus*)是我国华南地区最主要的纸浆用材林树种之一,主要栽培于南方的广东、广西、海南、福建、云南、贵州、湖南、江西等省区,面积超过 150 万 hm²,仅次于巴西和印度^[9],带来了巨大的社会经济效益。然而大面积发展桉树人工林也带来许多生态环境问题,如河川径流减少^[10-14]。而桉树人工林冠层、凋落物层和土壤是水文过程转化的重要界面,对流域径流的产生有重要的影响。目前我国对桉树人工林研究多集中于生物多样性^[15]、蒸腾作用^[16]、水文学效应^[17]等,对其林冠层、凋落物层降水截留、土壤水分保持等方面研究还较少。本文以华南地区桉树人工林为研究对象,旨在揭示其冠层截留、凋落物和土壤水文生态功能与特性,为桉树人工林大面积发展区域林水调控、生态造林及其合理发展提供理论指导和科学依据。

1 研究区概况

本研究位于广东省肇庆高要市西江林业局林科所长坑尾桉树人工林小集水区(E112°29',N23°01'),属南亚热带季风气候区,年平均气温 22.2℃,平均最高气温 26.4℃,平均最低气温 19.2℃,平均相对湿度 78.1%,年均降水 1637.7 mm,4—9 月份降雨量最多,占全年降雨量 83%,历年平均降雨日数 156 d,年均蒸发量 1096.8mm,平均日照时数 1735.2 h,平均风速 1.8 m/s。

研究区土壤为红黄壤,土层较厚,地带性植被为亚热带常绿季雨林,以壳斗科、樟科、山茶科占优势,林下热带性灌木种类繁多,附生藤本植物较多,亚热带雨林破坏后的次生植物,以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)等群落占优势。桉树人工林为尾巨桉(*Eucalyptus. urophylla* × *E. grandis*),林龄 6 a,2007 年 6 月测定其平均胸径 12.6cm,平均树高 17.3m,林分平均密度为 1769 株 · hm⁻²,平均叶面积指数为 3.38(表 1)。

表 1 桉树人工林基本概况
Table 1 Basic characteristics of Eucalyptus plantation

样地号 Plot	坡向 Aspect	坡位 Slope location	坡度 Slope	平均胸径/cm Mean breast diameter	平均树高/m Mean height	林分密度 (stem · hm ⁻²) Density	叶面积指数 Leaf area index
1	北	下	35	13.5	17.2	1708	3.34
2	北	中	33	12.0	17.6	1933	3.10
3	北	上	29	12.2	17.0	1667	3.70

2 研究方法

2.1 冠层水文功能测定

冠层水文过程观测时间为 2006 年 5 月—2007 年 5 月。大气降雨利用安置在距离样地约 150m 空地的自记雨量计测定;在桉树人工林内按“口”字形布设 4 根 3.8 m 长、水平面积合计 2.39 m²的集雨槽,通过 PVC 管收集水量,利用翻斗式流量计自动记录穿透雨量;选择 5 m × 5 m 范围内的所有桉树(9 株),用橡胶管在树干 1.3m 以下缠绕到树干基部,将所有树干茎流水通过橡胶管导入量水器内,自动记录每场降雨的树干茎流量,最后计算单位面积的树干茎流量(mm)。林冠截留量采用水量平衡法计算。

2.2 凋落物贮量及持水能力测定

在桉树人工林样地所处坡面的上、中、下坡位分别取 2 个 60cm × 60cm 的凋落物样方,按枝、叶、皮分别收

集,带回室内 65℃ 烘干称重,推算凋落物贮量;然后按枝、叶、皮分别取样,称重后置于尼龙网袋内,浸水 24h,取出静置 5—10min,直至凋落物不滴水为止,称其饱和重量,分别计算其最大持水率(%),并根据凋落物贮量计算样地的最大持水能力(mm)。

2.3 土壤水文物理性质测定

在中坡固定样地挖掘土壤剖面 2 个,利用 100 cm³ 环刀按 0—10、>10—20、>20—40、>40—60、>60—80、>80—100cm 土层取样,带回室内测定土壤容重、孔隙度、持水能力和渗透性^[18]等物理性质。

3 结果与分析

3.1 桉树人工林冠层对降雨的分配作用

研究期间(2006-05—2007-05)大气降雨量为 2016.7mm,通过林冠层后降雨被重新分配,其中穿透降雨量 1728.4 mm,树干茎流量 72.9 mm,冠层截留量 215.4mm,分别占总降雨量的 85.70%、3.62% 和 10.68%。

研究表明,穿透降雨量(TF ,mm)与大气降雨量(RF ,mm)存在显著线性相关关系($P < 0.01$,图 1),穿透降雨率(TF ,%)随大气降雨量(RF ,mm)的增加而增大,特别是降雨量小于 20mm 时增加趋势显著,但当降雨量超过 20mm,穿透降雨率基本保持稳定,二者呈显著双曲线关系($P < 0.05$)。

树干茎流对林木生长也具有十分重要的意义^[19]。树干茎流(SF ,mm)随降雨量(RF ,mm)的增加呈显著线性增大($P < 0.01$),如图 2 所示,树干茎流的产生存在一个临界雨量,当降雨量超过 3.9 mm 后,桉树人工林开始产生树干茎流,并随降雨量的增大而增大。

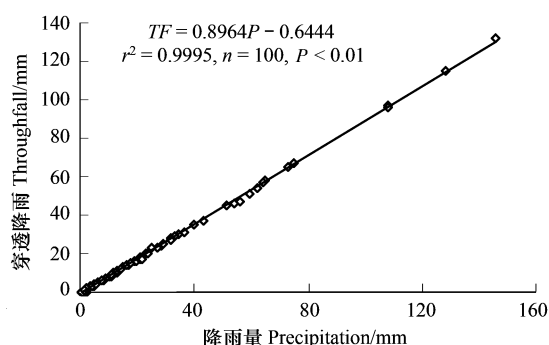


图 1 桉树人工林穿透降雨与大气降雨的关系

Fig.1 Relation of throughfall against precipitation in the Eucalyptus plantation

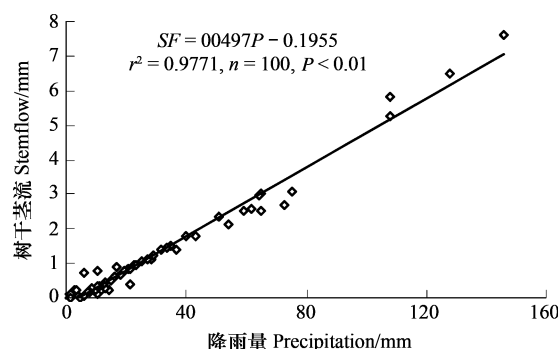


图 2 桉树人工林树干茎流与大气降雨的关系

Fig.2 Relation of stemflow against precipitation in the Eucalyptus plantation

大气降雨通过冠层后,部分降水被林冠层截留。冠层截留量随降雨量增大呈增大趋势,而林冠截留率 I (%)与降雨量(RF ,mm)呈显著幂函数负相关($P < 0.05$),降雨量小于 20mm 时,冠层截留率随降雨量增大而急剧减小,降雨量超过 20 mm 时,冠层截留率基本保持稳定,如图 3 所示。

不同雨量级对林冠层的降雨再分配也有影响,从表 2 可以看出,随着雨量级的增大,林内穿透雨、树干茎流和林冠截留量呈逐渐增大趋势,但冠层截留率随雨量级增大逐渐减小。

林冠对降雨再分配作用具有明显的季节性。表 3 可以看出,4—9 月份的大气降雨量较大,10 月至翌年 3 月份的降雨量较小,穿透降雨、树干茎流和冠层截留量

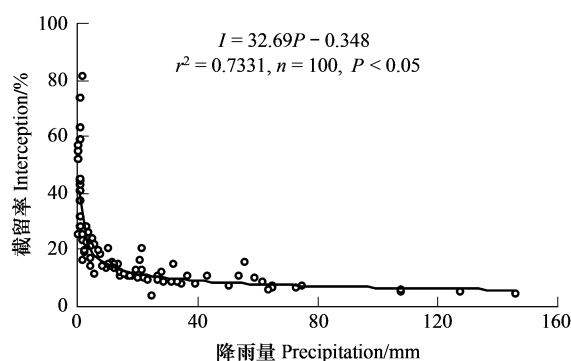


图 3 桉树人工林冠层截留率与大气降雨的关系

Fig.3 Relation of interception against precipitation in the Eucalyptus plantation

也随大气降雨的季节变化而变化。

表 2 桉树人工林不同雨量级降雨再分配
Table 2 Redistribution of different class of precipitation in the Eucalyptus plantation

雨量等级/mm Rainfall class	次数 Times	平均降雨/mm Mean rainfall	穿透降雨 Throughfall		树干茎流 Stemflow		截留量 Interception	
			/mm	/%	/mm	/%	/mm	/%
0.0—5.0	42	1.66	1.14	68.38	0.03	1.53	0.50	30.08
>5.0—10.0	7	6.70	5.23	78.05	0.23	3.44	1.24	18.50
>10.0—20.0	18	13.61	11.37	83.51	0.42	3.11	1.82	13.37
>20.0—40.0	18	27.66	23.83	86.14	1.08	3.89	2.88	10.40
>40.0—100.0	11	60.65	51.82	85.44	2.03	3.34	6.99	11.52
>100.0	4	122.50	110.12	89.89	6.29	5.13	6.09	4.97

表 3 桉树人工林不同月份降雨再分配
Table 3 Redistribution of precipitation in the Eucalyptus plantation on different months

月份 Month	降雨/mm Precipitation	穿透降雨 Throughfall		树干茎流 Stemflow		冠层截留 Interception	
		/mm	/%	/mm	/%	/mm	/%
2006-05	361.5	318.1	88.0	11.0	3.1	32.4	9.0
2006-06	558.7	479.1	85.8	25.0	4.5	54.6	9.8
2006-07	282.7	250.7	88.7	13.3	4.7	18.6	6.6
2006-08	113.5	96.1	84.7	2.5	2.2	14.9	13.1
2006-09	125.7	105.1	83.6	2.1	1.7	18.6	14.8
2006-10	3.3	2.5	75.0	0.0	0.0	0.8	25.0
2006-11	85.0	69.8	82.1	0.8	0.9	14.5	17.0
2006-12	24.6	20.1	81.6	0.3	1.2	4.2	17.1
2007-01	84.0	74.1	88.3	2.9	3.5	7.0	8.3
2007-02	59.9	48.8	81.5	2.1	3.5	9.0	15.0
2007-03	46.7	35.5	76.1	1.0	2.1	10.2	21.8
2007-04	143.7	120.1	83.6	7.1	4.9	16.5	11.5
2007-05	127.5	108.4	85.0	4.9	3.8	14.2	11.1
合计 Total	2016.8	1728.4	85.7	72.9	3.6	215.4	10.7

3.2 凋落物层蓄积量及持水能力

森林凋落物层的水文功能主要表现为拦蓄降雨、阻延地表径流、降低雨滴动能,从而减少水土流失,其水文生态效应的强弱主要取决于蓄积量和持水率的大小。研究表明,6年生桉树人工林凋落物层总蓄积量平均为 $42.09\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中树皮、树枝、树叶分别占7.32%、51.09%和41.59%;最大持水率以树叶最大,达139.99%,其次为树皮,为130.76%,树枝最小,仅66.21%;凋落物层饱和持水量为4.27mm,树皮、树枝和树叶分别为0.40 mm、1.42 mm和2.45 mm。

3.3 土壤物理性质及贮水能力

土壤水分渗透性、孔隙度和容重是土壤水文生态功能的重要方面,是影响地表径流和林地土壤水分调节能力的重要因素。研究表明,随着土壤深度的增加,土壤的初渗速率、稳渗速率、总孔隙度和毛管孔隙度均逐渐降低,当到达>80—100cm土层时,初渗速率和稳渗速率分别由土壤表层(0—10cm)的 $25.03\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $8.83\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 减小到 $0.35\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,表明土壤表层的渗透性能显著优于下层土壤;土壤容重随土层的增加呈增大趋势,如表5所示。

森林具有较强的水源涵养能力,主要取决于土壤和森林的综合状况,其中,最大贮水量反映了土壤的总贮水能力,非毛管贮水量反映了土壤调节水分的能力。从表6可以看出,桉树人工林整个土壤层(0—100cm)的最大贮水量为 $4700.6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,相当于470.06mm降水,其中非毛管贮水量为 $982.2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,相当于98.22mm

降水。

表 4 桉树人工林凋落物层蓄积量及贮水能力

Table 4 Storage and water capacity of litter in the Eucalyptus plantation

样方号 Plot	蓄积量 Storage/(t·hm ⁻²)				最大持水率 Maximum moisture content/%			饱和持水深 Maximum water storage/mm			
	皮 Bark	枝 Branch	叶 Leaf	合计 Total	皮 Bark	枝 Branch	叶 Leaf	皮 Bark	枝 Branch	叶 Leaf	合计 Total
1	2.88	10.87	12.34	26.08	130.76 ± 4.94	66.21 ± 9.22	139.99 ± 10.04	0.38	0.72	1.73	2.82
2	2.02	24.04	12.35	38.41				0.26	1.59	1.73	3.59
3	3.56	29.69	19.68	52.93				0.47	1.97	2.75	5.19
4	3.38	12.99	13.65	30.02				0.44	0.86	1.91	3.21
5	2.91	25.64	15.99	44.55				0.38	1.7	2.24	4.32
6	3.73	25.82	31.03	60.58				0.49	1.71	4.34	6.54
平均 Mean	3.08 ±	21.51 ±	17.51 ±	42.09 ±				0.40 ±	1.42 ±	2.45 ±	4.27 ±
	0.62	7.68	7.19	13.27				0.08	0.51	1.01	1.39

表 5 桉树人工林土壤水文物理性质

Table 5 Soil hydro-physical characteristics in the Eucalyptus plantation

土层/cm Soil Depth	土壤容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/% Total porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity	初渗速率 Initial infiltration /(mm·min ⁻¹)	稳渗速率 Steady infiltration /(mm·min ⁻¹)
0—10	1.13 ± 0.03	53.80 ± 0.80	35.93 ± 1.13	17.87 ± 0.33	25.03	8.83
>10—20	1.12 ± 0.01	51.40 ± 1.98	40.85 ± 2.19	10.55 ± 3.54	6.45	0.38
>20—40	1.38 ± 0.03	47.75 ± 0.27	37.85 ± 0.39	9.90 ± 0.17	6.28	0.34
>40—60	1.41 ± 0.01	45.25 ± 1.72	37.37 ± 1.33	7.88 ± 0.38	2.83	0.52
>60—80	1.52 ± 0.01	44.72 ± 0.32	36.67 ± 0.60	8.05 ± 0.28	1.19	0.24
>80—100	1.53 ± 0.01	44.72 ± 0.98	35.65 ± 2.05	9.07 ± 3.03	0.35	0.10
加权平均 Weighted Mean	1.39	47.01	37.19	9.82	—	—

表 6 桉树人工林土壤持水率及贮水能力

Table 6 Soil storage capacity in the Eucalyptus plantation

土层/cm Soil Depth	饱和含水率/% Saturated water content	毛管含水率/% Capillary water content	田间持水量/% Field water content	总贮水量/mm Total water capacity	毛管贮水量/mm Capillary storage	非毛管贮水量/mm Non-capillary storage
0—10	48.27 ± 2.05	32.07 ± 1.80	31.12 ± 1.87	53.80 ± 0.80	35.93 ± 1.13	17.87 ± 0.33
>10—20	46.41 ± 1.86	34.31 ± 1.78	33.06 ± 1.57	51.40 ± 1.98	40.85 ± 2.19	10.55 ± 3.54
>20—40	34.70 ± 0.96	26.69 ± 0.36	26.07 ± 0.39	95.50 ± 0.53	75.70 ± 0.78	19.80 ± 0.33
>40—60	32.27 ± 1.25	26.54 ± 1.01	25.59 ± 1.16	90.50 ± 3.43	74.73 ± 2.67	15.77 ± 0.77
>60—80	29.50 ± 0.38	24.17 ± 0.50	21.53 ± 2.21	89.43 ± 0.63	73.33 ± 1.20	16.10 ± 0.57
>80—100	29.26 ± 0.35	23.31 ± 1.60	22.42 ± 1.52	89.43 ± 1.97	71.30 ± 4.10	18.13 ± 6.07
0—100	34.61	26.78	25.54	470.06	371.84	98.22

4 结论与讨论

林冠层是影响大气降雨再分配的重要因素,它改变了水文循环过程。林冠截留、树干茎流、穿透降雨和林外大气降水的关系及其影响因素是森林水文生态研究的重要内容之一。本研究表明,大气降水和桉树人工林林冠截留量存在幂函数关系,而与穿透降雨、树干茎流量之间均存在显著直线关系。这主要是由于林冠截留主要受大气降水和林冠表面物理特性的控制,而林内净降水还受树叶、树皮物理特性等因素的制约。

2006-05—2007-05 期间桉树人工林的总穿透降雨、树干茎流和截留量分别占大气降水的 85.70%、

3.62% 和 10.68%。世界不同区域桉树林对降水截留的差异较大,截留率多介于 10%—34%,且随降雨量的增大而减少^[20]。本研究桉树人工林冠层截留率与印度南部半干旱区^[21]和巴西的^[22]桉树人工林的基本相当(其截留率分别为 11% 和 10%),而低于澳大利亚天然桉树人工林冠层截留率,据研究,西澳大利亚干旱区的桉树林降水截留率可达 22.7%^[23],新南威尔士州桉树老龄林冠层截留率为 14.8%^[24],30 年生桉树林最大截留率为 26%,240 年生成熟桉树林冠层截留率为 17%^[25]。造成这些差异的原因,可能是印度、巴西等地的桉树与我国华南地区相似,均为人工林,栽培过程中林下灌木层较少,截留量低,叶面积指数也相当,其截留率也基本相当,但澳大利亚天然桉树林的林下植被较好,叶面积指数相对更大,其截留率相对较高。

与华南地带性植被相比,桉树人工林冠层截留率远低于本地区鼎湖山季风常绿阔叶林(24.7% 和 27.6%)^[26]、针叶林(17.18%)^[27]和针阔混交林的冠层截留率(28.24%)^[28],也低于本区毛竹林的冠层截留率(25.3%)^[29]。林冠层截留率主要受群落结构、冠层结构及叶面积指数等的差异影响,与桉树人工林相比,本区地带性植被的林分结构复杂,具有多层结构,叶面积指数较大,这可能是其截留率较大的主要原因。

树干茎流一般在冠层水分再分配中所占份额较小,但对于植被生长及养分循环具有重要作用^[19]。本研究桉树人工林树干茎流率为 3.62%,低于成熟王桉林(4.3%)、40 年生王桉林(5.3%)和 *E. signata* 林(13%)的茎流率^[30],而高于 *E. melanophloia* 林(0.6%)和 *E. umbra* 林(3%)的树干茎流率。与其它树种相比,桉树人工林的树干茎流率较马尾松林的高(0.15%)^[27];与本地区其它植被类型对比,桉树人工林茎流率低于季风针阔混交林(5.2%)^[28]和毛竹林(6.8%)^[29]的。这些差异可能主要是由于林分结构、密度及降雨差异等所致。

凋落物持水是森林的重要水文功能之一,森林凋落物层的最大持水能力反映其最大截留量,是其潜在蓄水能力,因此经常被作为森林水文生态功能的重要指标。一般凋落物层蓄积量越大,持水率越高,其截留降水的能力就越大,桉树人工林的凋落物蓄积量平均为 42.09 t·hm⁻²,其最大蓄水量为 42.8 t·hm⁻²,相当于 4.28mm 降雨。与其它林分类型的凋落物相比,低于武夷山甜槠林(5.2mm)和滇中常绿阔叶林(5.4mm)的最大持水量,但显著高于海南岛山地雨林和热带次生林(0.7—1.1mm)^[31],这主要与桉树人工林凋落物层分解较慢,蓄积量较大有关。

森林土壤是森林生态系统最主要的水分贮藏场所和调节器。研究结果表明,桉树人工林土壤表层(0—10cm)的初渗速率和稳渗速率分别为 25.03 mm·min⁻¹和 8.83 mm·min⁻¹,较武夷山成熟甜槠天然林的(78.6 mm·min⁻¹和 15.5 mm·min⁻¹)^[32]要小,较广州毛竹人工林的(11.9 mm·min⁻¹和 7.9 mm·min⁻¹)^[29]要大,之所以差异较大,主要是由于天然林土壤受破坏程度较小,土壤孔隙度较大,而毛竹人工林由于其经营强度较桉树人工林大,土壤孔隙度较桉树人工林的小,即桉树人工林土壤受人为干扰程度大大强于天然林,而弱于毛竹人工林。此外,桉树人工林土壤(0—100 cm)的有效蓄水量为 98.22 mm,林地土壤的最大蓄水量为 470.06mm。这些值低于或接近亚热带和热带山地森林的土壤蓄水能力^[31-32],可能是由于桉树人工林的经营管理以及对土壤的干扰所导致的。

References:

- [1] 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): 76-85.
- [2] Liu S R, Wen Y G, Wang B. Eco-hydrological functions of forest ecosystem in China. Beijing: Chinese Forestry Press, 1996: 61-62.
- [3] Shi Z J, Wang Y H, Xiong W, Yu P T, Guo H, Zhang L Y, Dong X H. The spatial heterogeneity of throughfall under the *Larix principis-rupprechtii* single tree's canopy. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2877-2886.
- [4] Xie C H, Guan W B, Wu J A, Chen G W, Luo J. Interception capability of dark coniferous forest ecosystem in Gongga Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(4): 68-71.
- [5] Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, Xiong W, Yu P T, Guo H, Zhang L Y. Hydrological functions of litter layer of typical forest types in the Liupan Mountains of Ningxia, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(1): 91-99.
- [6] Zhu J Z, Liu J Z, Zhu Q K, Wu Q X. Hydro-ecological functions of forest litter layers. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 30-34.

- [7] Shi Z J, Wang Y H, Yu P T, Xiong W, Guo H, Guo M C. Study on different forestry vegetations eco-hydrological function in Liupan Mountain of Ningxia China. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2005, 19(3): 134-138.
- [8] Li D S, Zhang P, Zhang S L, Yin J D, Lu F D. A study on water conservation capacity of forest soil in Huangqian Reservoir Area. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2004, 28(1): 25-28.
- [9] Xu D P, Zhang N N. A Review of ecological effect in the eucalyptus plantations. *Guangxi Forestry Science*, 2006, 35(4): 179-187; 201.
- [10] Cornish P M. The effects of logging and forest regeneration on water yields in a moist eucalypt forest in New South Wales, Australia. *Journal of Hydrology*, 1993, 150: 301-322.
- [11] Scott D F, Lesch W. Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa. *Journal of Hydrology*, 1997, 199(3/4): 360-377.
- [12] Vital A R T, Lima W P, Camargo F R A. Efeitos do corte raso de uma plantaço de *Eucalyptus* sobre o balan o hídrico, a qualidade da água e as perdas de solo e de nutrientes em uma microbacia no Vale do paraíba, SP. *Scientia Forestalis*, 1999, 55: 5-16.
- [13] Cornish P M, Vertessy R A. Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a eucalypt forest. *Journal of Hydrology*, 2001, 242: 43 - 63.
- [14] Sikka A K, Samra J S, Sharda V N, Samraj P, Lakshmanan V. Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiris watersheds of South India. *Journal of Hydrology*, 2003, 270(1/2): 12-26.
- [15] Chen Q B. A Review of Researches on Biodiversity in *Eucalyptus* Plantations. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2001, 22(4): 82-90.
- [16] Zhang N N, Xu D P, Morris J, Zhou G Y, Zhou G Y, Wu Z M. Water Consumption of *Eucalyptus urophylla* Plantations on the Leizhou Peninsula. *Forest Research*, 2007, 20(1): 1-5.
- [17] Zhou G Y, Morris J D, Yan J H, Peng S L. Hydrological impacts of reafforestation with eucalypts and indigenous species: a case study in southern China. *Forest Ecology and Management*, 2002, 167: 209-222.
- [18] Department of Science and Technology, Ministry of Forestry of China. The fix position research methods of forestry ecology. Beijing: Chinese Science Technology Press, 1994.
- [19] Wan S Q, Chen L Z. Characteristics of precipitation and forest stemflow of Dongling Mountainous area. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 61-67.
- [20] Feller M C. Water balances in *Eucalyptus regnans*, *E. obliqua* and *Pinus radiata* forests in Victoria. *Australian Forestry*, 1981, 44: 153-161.
- [21] Hall R L, Calder I R, Rosier P T W. Measurements and modelling of interception loss from a *Eucalyptus* plantation in southern India//Calder I R, Hall R L, Adlard P G eds. *Growth and Water Use of Forest Plantations*. Wiley, Chichester, 1992: 270-289.
- [22] Soares J V, Almeida A C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*, 2001, 253: 130-147.
- [23] White D A, Dunin F X, Turner N C, Ward B H, Galbraith J H. Water use by contour-planted belts of trees comprised of four *Eucalyptus* species. *Agricultural Water Management*. 2002, 53: 133-152.
- [24] Putuhena W, Cordery I. Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to *Pinus radiata*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100: 59-72.
- [25] Langford K J, O'Shaughnessy P J. A study of canopy interception in native forests and conifer plantations. Melbourne and Metropolitan Board of Works, Catchment Hydrology Research Report Number MMBW-W-0007, 1978: 88.
- [26] Hang Z L, Kong G H, Yu Q F, Zhang Z H. Hydrological function and nitrogen dynamics in lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 157-161.
- [27] Mo J M, Fang Y T, Feng Z N, Kong G H, Meng Z. Ecohydrological functions of a human-disturbed *Pinus massoniana* forest in Dinghusan Biosphere Reserve. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, 10(2): 99-104.
- [28] Yin G C, Zhou G Y, Liu J S, Zhang D Q, Wang X. Hydrological effects of coniferous and broadleaved mixed forest ecosystem in Dinghushan. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2004, 12(3): 195-201.
- [29] Wang D Y, Zhang Z W, Su K J, Wang G, Lei Y F, Lin M L, Zhang P, Zhong Y. Hydrology of *Phyllostachys pubescens* in Liuxihe, Guangdong Province. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(1): 37-41.
- [30] Lima W P. The hydrology of *Eucalypt* forests in Australia — A review. *IPEF*, 1984, 28: 11-32.
- [31] Li L H, Lin P, Wang Q B, He J S, He J Y, Liu C D, Jing C S, Cheng R H. Hydrological observation in an evergreen broad leaved forest in the Wuyi Mountains. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(5): 393-402.
- [32] Chen B F, Zhou G Y, Zeng Q B, Wu Z M, Li Y D. Study on the hydrologic dynamic characteristics of tropical mountain rain forest on Jianfengling. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(1): 68-75.

参考文献:

- [1] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,熊伟,于澎涛,郭浩. 六盘山华山松林(*Pinus armandii*)降雨再分配及其空间变异特征. 生态学报, 2009, 29(1): 76-85.
- [2] 刘世荣,温远光,王兵. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京:中国林业出版社,1996: 61-62.
- [3] 时忠杰,王彦辉,熊伟,于澎涛,郭浩,张雷燕,董晓红. 单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性. 生态学报, 2006, 26(9): 2877-2886.
- [4] 谢春华,关文彬,吴建安,程根伟,罗辑. 贡嘎山暗针叶林生态系统林冠截留特征研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 68-71.
- [5] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,熊伟,于澎涛,郭浩,张雷燕. 六盘山主要森林类型枯落物水文生态功能. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 91-99.
- [6] 朱金兆,刘建军,朱清科,吴钦孝. 森林凋落物层水文生态功能研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 30-34.
- [7] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,熊伟,郭浩,郭明春. 宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究. 水土保持学报, 2005, 19(3): 134-138.
- [8] 李德生,张萍,张水龙,尹建道,鲁法典. 黄前库区森林土壤蓄水能力研究. 南京林业大学学报, 2004, 28(1): 25-28.
- [9] 徐大平,张宁南. 桉树人工林生态效应研究进展. 广西林业科学, 2006, 35(4): 179-187; 201.
- [15] 陈秋波. 桉树人工林生物多样性研究进展. 热带作物学报, 2001, 22(4): 82-90.
- [16] 张宁南,徐大平,Jim Morris,周光益,周国逸,吴仲民. 雷州半岛尾叶桉人工林耗水量研究. 林业科学研究, 2007, 20(1): 1-5.
- [18] 林业部科技司 编. 森林生态系统定位研究方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- [19] 万师强,陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流. 生态学报, 2000, 20(1): 61-67.
- [26] 黄忠良,孔国辉,余清发,张志红. 亚热带季风常绿阔叶林水文功能及其养分动态的研究. 植物生态学报, 2000, 24(2): 157-161.
- [27] 莫江明,方运霆,冯肇年,孔国辉,孟泽. 鼎湖山人为干扰下马尾松林水文生态功能. 热带亚热带植物学报, 2002, 10(2): 99-104.
- [28] 尹光彩,周国逸,刘景时,张德强,王旭. 鼎湖山针阔混交林生态系统水文效应研究. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(3): 195-201.
- [29] 王冬云,张卓文,苏开君,王光,雷云飞,林明磊,张培,钟庸. 广州流溪河流域毛竹林的水文生态效应. 浙江林学院学报, 2008, 25(1): 37-41.
- [31] 李凌浩,林鹏,王其兵,贺金生,何建源,刘初钿,金昌善,陈仁华. 武夷山甜槠林水文学效应的研究. 植物生态学报, 1997, 21(5): 393-402.
- [32] 陈步峰,周光益,曾庆波,吴仲民,李意德. 热带山地雨林生态系统水文动态特征的研究. 植物生态学报, 1998, 22(1): 68-75.