

# 两种森林集水区径流量及其径流过程初步分析

郭晋川<sup>1</sup>, 梁宏温<sup>2</sup>, 潘伟<sup>1</sup>, 李荣辉<sup>1</sup>, 李晓琼<sup>2</sup>, 蓝刚<sup>1</sup>, 马倩<sup>2</sup>

(1. 广西壮族自治区水利科学研究院, 南宁 530000; 2. 广西大学, 南宁 530004)

**摘要:**研究桉树林和马尾松林集水区的径流量及其径流过程, 为科学评估森林的水源涵养功能提供参考依据。于2013年8月—2014年7月运用小流域径流监测方法和自动采集数据, 对桉树林和马尾松林集水区的径流量进行定位观测, 并分析强降雨和连续降雨对径流过程的影响。结果表明: 桉树林集水区的年径流深和径流系数分别为107.7 mm和8.2%, 马尾松林的依次为319.4 mm和24.2%。在前期没有径流情况下, 一次强降雨过程(降水量147.5 mm), 两种森林集水区的径流历时、径流最大值滞后于降雨峰值的时间和总径流深都存在明显差异, 桉树林的分别为13.8 h, 0.2 h和35.6 mm, 马尾松林的依次为35.5 h, 0.7 h和28.5 mm。一次连续7 d的降雨过程(降水量125.0 mm), 桉树林集水区只产生4 d径流, 总径流深仅3.8 mm; 马尾松林集水区则连续产生13 d径流, 总径流深达10.1 mm。综上所述, 马尾松林的水源涵养功能明显优于桉树林。

**关键词:** 马尾松林; 桉树林; 集水区; 径流量; 径流过程

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0055-05

## Preliminary Study on the Runoff and Its Processes of Two Kinds of Forest Watersheds

GUO Jinchuan<sup>1</sup>, LIANG Hongwen<sup>2</sup>, PAN Wei<sup>1</sup>, LI Ronghui<sup>1</sup>, LI Xiaojiong<sup>2</sup>, LAN Gang<sup>1</sup>, MA Qian<sup>2</sup>

(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Hydraulic Research Institute, Nanning 530000, China; 2. Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The runoff and runoff process of *Eucalyptus* and *Pinus massoniana* forest watersheds were investigated to provide guidance for scientific evaluation of water conservation capacities of forest. The runoff characters of *Eucalyptus* and *P. massoniana* forest watersheds were continuously monitored using the small watershed runoff monitoring method and the automatic data collection devices from August, 2013 to July, 2014, and effects of heavy rainfall and continuous rainfall on the runoff process were studied. We found that the annual runoff depth and the runoff coefficient of *Eucalyptus* forest watershed were 107.7 mm and 8.2%, respectively, while those of *P. massoniana* forest watershed were 319.4 mm and 24.2%, respectively. When there was no runoff, runoff duration, time lags, maximum runoff of rainfall, and runoff depth amounts caused by a heavy rainfall process (amounting to 147.5 mm) between the two kinds of forest watershed were significant different; those of *Eucalyptus* forest were 13.8 hours, 0.2 hours and 35.6 mm, respectively, while those of *P. massoniana* forest watershed were 35.5 hours, 0.7 hours and 28.5 mm, respectively. *Eucalyptus* forest watershed produced only 4-day runoff, and the runoff depth amounted to 3.8 mm with a 7 days continuous precipitation process of rainfall with 125.0 mm, while *P. massoniana* forest watershed produced continuously 13-day runoff, and the runoff depth was 10.1 mm. In conclusion, water conservation capacity of *P. massoniana* forest is much better than *Eucalyptus* forest.

**Keywords:** *P. massoniana* forest; *Eucalyptus* forest; watershed; runoff; runoff processes

森林与水的关系一直是生态和水文学研究的热点, 森林植被对径流的影响是生态水文研究的重要内容, 也是区域水资源评价的核心<sup>[1-5]</sup>。径流变化受

森林植被、流域面积和降水等多种因素影响, 其中降水的影响最大。由于降水过程的不同, 森林植被对径流的影响也存在较大差异<sup>[6-8]</sup>。近期研究表明<sup>[9-11]</sup>,

森林植被在雨季消减洪峰和旱季增加产流的作用可能有所夸大,森林植被与径流形成的关系,尚有待于进一步验证。

桉树和马尾松是中国南方地区的主要用材树种,其森林面积较大。然而,这两种森林小流域(自然集水区)的径流特征,目前鲜见报道。本文运用小流域径流监测方法,并自动采集数据,对位于广西横县的桉树林和马尾松林自然集水区的径流量及其径流过程进行定位监测,旨在科学评估这两种森林的水源涵养功能提供参考依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区自然条件

研究区位于广西横县新福镇,东经 108°51′—108°55′,北纬 22°30′—22°36′,海拔 80~160 m。属于亚热带季风气候区,年均气温 21.5℃,最热月(8 月)均温 27.3℃,极端最高温 39.2℃,最冷月(1 月)均温 12.1℃,极端最低温-1.2℃,年均降雨量 1 320.0 mm,年均日照 1 758.9 h,年均蒸发量 1 655.1 mm,年均无霜期 338 d。地带性土壤为花岗岩风化形成的砖红壤,土层厚 80~100 cm;地带性的森林植被为亚热带常

绿阔叶林,但已荡然无存,并转变为桉树(*Eucalypt*)林和马尾松(*Pinus massoniana*)林。

1.2 研究林分及其集水区概况

研究林分为桉树林和马尾松林。两种林分的集水区都位于广西横县新福镇那河村公净水库集雨区的西北方向,均属于同一山丘(最高处海拔 156.6 m)向东南方向延伸的两坡夹一沟“Δ 形”集水区,坡度 20°~30°,沟底线落差较平缓(2%~3%),两个集水区之间隔开一条山沟及其两侧山坡,出口处水平距离约 160 m。

于 2013 年 6 月对两个集水区进行本底调查。根据海拔、坡位和坡度的差异,每个集水区各设计 5 个面积均为 400 m<sup>2</sup>(20 m×20 m)的调查样地。将每个样地沿等高线划分为上下两部分,再按左右二等分成 4 个面积均为 100 m<sup>2</sup>(10 m×10 m)的样方,目测林冠层的郁闭度,实测样方内每株林木的高度和胸径。以每个样方(10 m×10 m)的左上角为顶点向下和向右各设计 1 个面积为 25 m<sup>2</sup>(5 m×5 m)的小样方,记录小样方内的灌木和草本植物的种类、高度和盖度。在各样地内随机设计 5 个面积为 1 m<sup>2</sup>(1 m×1 m)的小样方,测定枯枝落叶层厚度和贮量(收获法)。各样地的立地概况和群落学特征见表 1。

表 1 各样地的立地概况和林分特征

林分类型	样地号	地形			乔木层			灌木层		草本层		桔枝落叶层特征	
		海拔/ m	坡位	坡度/ (°)	胸径/ cm	树高/ m	郁闭度	高度/ m	覆盖度/%	高度/ m	覆盖度/%	厚度/ cm	贮量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
马尾松林	1	155	上坡	22	13.2	7.2	0.6	0.7	30	0.7	26	6	6.75
	2	130	中坡	30	16.7	12.7	0.7	2.1	46	1.3	30	12	8.62
	3	110	下坡	28	19.4	14.5	0.8	2.5	48	1.5	35	15	12.20
	4	150	山脊	25	11.4	9.8	0.6	0.5	30	0.5	20	5	4.32
	5	135	中坡	30	18.6	13.9	0.7	1.8	35	1.5	25	13	10.45
	6	150	上坡	20	10.4	11.7	0.4	0.8	10	1.6	90	1	0.76
	7	130	中坡	30	11.8	13.1	0.5	1.8	15	1.8	90	2	1.13
桉树林	8	110	下坡	30	12.4	13.5	0.6	2.0	18	2.0	95	3	1.52
	9	140	山脊	25	9.8	11.6	0.4	0.5	10	1.5	80	1	0.45
	10	135	中坡	28	12.1	12.9	0.5	2.0	13	2.0	92	2	1.25

马尾松林集水区面积 6.605 hm<sup>2</sup>,现实林分为自然下种更新森林,树龄 15~30 a,林木密度 1 250 株/hm<sup>2</sup>(马尾松 595 株,其他阔叶树 655 株);乔木层高 9.8~14.5 m,郁闭度 0.7,胸径 11.4~19.4 cm;灌木层高 0.5~2.5 m,平均总盖度 37.8%,以桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、棱枝冬青(*Ilex angulata*)、红叶藤(*Rourea minor*)、总状山矾(*Symplocos botryantha*)、华南毛柃(*Eurya ciliata*)为优势种类;草本层高 0.5~1.5 m,平均总盖度 27.2%,以铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、蔓生莠竹(*Microstegium vagans*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)为优势种类。枯枝落叶层厚 5~15 cm,贮量平均为 8.47 t/hm<sup>2</sup>。

桉树林集水区面积 3.682 hm<sup>2</sup>,现实林分为桉树萌芽林,是由 2005 年采伐马尾松天然林后种植桉树,于 2010 年 12 月采伐,经伐桩萌芽(保留 1 株/桩)培育而成的 3 a 生桉树纯林,乔木层高 11.6~13.5 m,郁闭度 0.5,林木密度 1 535 株/hm<sup>2</sup>,胸径 9.8~12.4 cm;灌木层高 0.5~2 m,平均总盖度 13.1%,以大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)、越南悬钩子(*Rubus cochinchinensis*)、山苍子(*Litsea cubeba*)、黄牛木(*Cratogeomys cochinchinense*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、玉叶金花(*Mussaenda kwangsiensis*)为优势种类;草本层高 1.5~2 m,平均总盖度 89.4%,以五节芒为主要优势种类。枯枝落叶层厚 1~3 cm,贮量平均为 1.02 t/hm<sup>2</sup>。

于 2013 年 6 月采用环刀法测定和计算集水区土壤的容重、持水量和孔隙度等物理性质,采用双环刀法测定和计算集水区的土壤渗透率<sup>[12]</sup>,环刀规格 20 cm<sup>2</sup>×5 cm。两个集水区土壤的水分物理性质见表 2。

表 2 两种森林集水区土壤的水分物理性质

森林类型	土层/cm	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	最大持水量/mm	毛管持水量/mm	最小持水量/mm	初渗系数/(mm·min <sup>-1</sup> )	稳渗系数/(mm·min <sup>-1</sup> )
马尾松林	0—20	1.18	36.31	13.47	49.78	103.30	83.81	64.10	15.21	5.28
	20—40	1.27	35.09	12.65	47.74	94.08	75.71	59.57	13.04	4.32
	40—60	1.44	31.45	11.07	42.52	85.54	69.85	52.20	10.40	3.44
	60—80	1.55	30.34	10.40	40.74	81.61	67.11	48.88	8.79	3.03
	80—100	1.64	28.95	9.56	38.51	76.74	63.72	44.77	5.67	2.35
	平均	1.42	32.43	11.43	43.86	88.25	72.04	53.90	10.62	3.70
桉树林	0—20	1.32	33.60	11.98	45.58	96.63	77.57	61.56	12.80	4.16
	20—40	1.38	32.13	12.08	45.21	91.43	73.95	57.17	12.22	3.71
	40—60	1.46	31.87	11.33	43.20	87.03	70.88	53.45	10.46	3.33
	60—80	1.56	30.78	10.66	41.44	83.17	68.20	50.19	8.91	3.01
	80—100	1.65	28.49	9.28	37.77	75.10	62.58	43.38	5.68	2.31
	平均	1.47	31.77	11.07	42.64	86.67	70.64	53.15	10.01	3.30

1.3 径流量观测

在研究林分集水区出水口一端各修建 1 座三角量水堰,量水堰出水口角度为 90°,量水堰拦水墙深入基岩 30 cm,并使用防水材料;其引水槽尺寸满足  $B>5h$ , $h/p<0.5$ , $h=0.06\sim0.65$  m, $B$  为引水槽内部宽度(m)、 $h$  为水头高度(m)、 $p$  为堰口底部至引水槽底部的高度(m)。于 2013 年 7 月 31 日各安装一台 WFX-40 型水位计(徐州市伟思水务科技有限公司生产),用来观测集水区的径流量及其径流过程。使用 YD-1003 型遥测终端机(徐州市伟思水务科技有限公司生产)自动采集数据,每隔 5 min 记录 1 次(水头高度有变化时,每隔 1 min 记录 1 次),采集期为 2013 年 8 月 1 日 0:00—2014 年 7 月 31 日 23:60。采用经验公式: $Q=1.343h^{2.47}$  计算集水区的瞬时流量( $m^3/s$ )<sup>[13]</sup>,式中  $h$  为水头高度(m)。根据径流时间和集水区面积计算出集水区的径流深(mm)。

1.4 大气降雨观测

在集水区附近空旷处架设 JD-05 型翻斗式自记雨量计(徐州市伟思水务科技有限公司生产),雨量计分辨率为 0.1 mm,用来观测每场降雨的降水量及其降水过程。使用 YD-1003 型遥测终端机自动采集数据,每隔 5 min 记录 1 次(降水量有变化时,每隔 1 min 记录 1 次),按每天、每月和每年统计降水量。

2 结果与分析

2.1 研究区的大气降雨特征

根据 2013 年 8 月 1 日—2014 年 7 月 31 日观测,期间有 87 d 产生降雨,总降水量 1 320.0 mm。参照

《地面气象观测规范》<sup>[14]</sup>,对各等级降水量进行统计。结果显示,大暴雨(100~249.9 mm)天气 2 次,降水量 361.5 mm,占总降水量的 27.4%;暴雨(50~99.9 mm)天气 4 次,降水量 247.5 mm,占总降水量的 18.8%;大雨(25~49.9 mm)天气 3 次,降水量 108.5 mm,占总降水量的 8.2%;中雨(10~24.9 mm)天气 19 次,降水量 287.5 mm,占总降水量的 21.8%;小雨(<10.0 mm)天气 59 次,降水量 315.0 mm,占总降水量的 23.9%。

由表 3 可以看出,研究区各月的降水量分配很不均衡,以 7 月和 8 月的降水量较多,分别达 349.4 mm 和 325.5 mm,占总降水量的 26.47%和 24.66%;其次是 11 月份和 9 月份,分别为 240.7 mm 和 121.7 mm,占 18.23%和 9.73%;1 月,5 月,10 月的降水量非常少,均在 15.0 mm 以下。

2.2 两种森林集水区径流量比较

表 3 显示:两种森林集水区单位面积产生的径流量存在明显的差异,以马尾松林的较高,其径流深合计达 319.4 mm,径流系数(径流总量占降水量比率)平均为 24.2%,是桉树林(107.7 mm 和 8.2%)的 2.97,2.95 倍。由表 3 可以看出,集水区各月的径流系数差异很大,两种森林的表现也不一致,又以 2013 年 8 月的表现最为突出,马尾松林集水区的径流系数高达 69.3%,桉树林的只有 2.2%,两者相差十分悬殊。究其原因主要在于:(1) 2013 年 7 月 26 日—29 日连续 4 d 降雨,总降水量 171.5 mm,其中 26 日的降水量达 145.1 mm<sup>[15]</sup>,这次强降雨产生的径流波及到 8 月份的监测结果,但两种森林所受到的影响截然不同,据 8 月 1 日 0:05 水位计记录的水头高度,马尾

松林的为 0.12 m,桉树林的仅 0.01 m,两者相差 0.11 m;(2) 2013 年 8 月总共发生 19 d 降雨,月降水量为 325.5 mm,以中小等级降雨天气为主,期间只下过 1 次大雨(降水量为 34.5 mm/d)。这种低强度的连续降雨,加上已有径流的叠加效应,非常有利于马尾松集水区径流的产生(8 月份总共 31 d 都有径流发生),其总径流深高达 225.7 mm;但对于桉树林是

不利的(只有 13 d 发生径流),其总径流深仅 7.1 mm;(3) 马尾松林的林下植被较为稀疏、枯枝落叶层较厚及其土壤孔隙结构较好(表 1 和表 2),穿透林冠的降水很容易随土壤入渗,再经土壤不透水层渗出至汇流沟一起产生径流;而桉树林的草本植被覆盖度很大(表 1),特别是五节芒,生长茂盛、密集分布、根系发达,能有效地阻挡低强度降雨的径流产生。

表 3 两种森林集水区径流深及其分配

观测指标	2013 年					2014 年							合计
	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	
降水量/mm	325.5	128.5	10.7	240.7	38.6	14.2	20.6	27.5	69.0	12.0	83.3	349.4	1320.0
各月分配/%	24.7	9.7	0.8	18.2	2.9	1.1	1.6	2.1	5.2	0.9	6.3	26.5	100.0
马尾松林 径流深/mm	225.7	11.0	0.0	30.1	4.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.4	47.8	319.4
集水区 径流系数/%	69.3	8.5	0.0	12.5	11.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.5	13.7	24.2
桉树林 径流深/mm	7.1	3.8	0.0	36.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	60.3	107.7
集水区 径流系数/%	2.2	3.0	0.0	15.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	17.3	8.2

2.3 强降雨对两种森林集水区径流过程的影响

2013 年 11 月 11 日 0:35—14:05 连续降雨历时 13.5 h(图 1),降水量达 147.5 mm,属于大暴雨天气。前 1 天(11 月 10 日)虽然下过 1 次小雨(降水量 8.9 mm),但两种森林集水区都没有产生径流。图 1 显示,马尾松林集水区量水堰口开始出现水流的时间为 3:35(累积降水量达到 5.5 mm),径流滞后于降雨的时间为 3 h;7:10,11:05 出现两次较大的降雨,其强度分别为 47.0 mm/h 和 72.0 mm/h,量水堰水位分别升至 0.17 m 和 0.31 m,11:47 累积降水量达到 144.5 mm 时,水位达到最大值 0.50 m,洪峰出现,瞬时流量 0.242 4 m<sup>3</sup>/s;其径流的时间为 3:35—次日 15:05,径流历时 35.5 h。桉树林集水区量水堰口开始出现水流的时间为 6:25(累积降水量达到 11.0 mm),径流滞后于降雨的时间为 5.8 h;7:10,11:05 量水堰水位分别升至 0.13 m 和 0.35 m,11:17 累积降水量达到 139.0 mm 时,水位达到最大值 0.41 m,洪峰出现,瞬时流量 0.148 5 m<sup>3</sup>/s;其径流的时间为 6:25—18:15,径流历时 13.8 h。该次强降雨过程,两种森林集水区开始产生径流的时间、径流最大值滞后于降雨峰值的时间和径流历时都明显不同,桉树林的分别为 5.8、0.2、13.8 h,马尾松林的依次为 3.0、0.7、35.5 h,两者相差 2.8、0.5、21.7 h。根据图 1 计算获得这一次大暴雨产生的径流深,是以桉树林(35.6 mm)的较高,马尾松林(28.5 mm)的较低,两者相差近 25%。这与桉树林地表层土壤容重较大、非毛管孔隙度较小、土壤板结、渗透系数较小有关(表 2),导致其在强降雨过程中更易发生地表径流。由此揭示,对于大暴雨的影响,桉树林的保水作用明显弱于马尾松林。

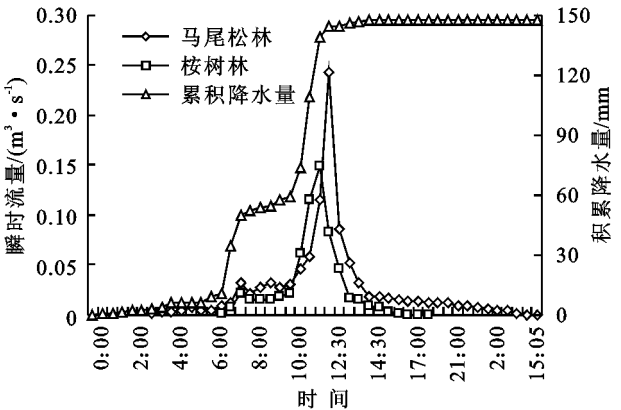


图 1 两种森林集水区瞬时径流量随降水量的变化曲线

2.4 连续降雨对两种森林集水区径流过程的影响

图 2 是 2013 年 9 月 1 日—13 日的降雨过程及两种森林集水区径流量的逐日分布曲线。图 2 显示,期间有连续 7 d 产生降雨,总降水量 125.0 mm,其中 1 次暴雨、1 次大雨、2 次中雨和 3 次小雨。由图 2 看出,桉树林集水区只有在降大雨和暴雨时才产生径流,且径流延续的时间很短(9 月 1 日大雨产生的径流在当日就完成,9 月 4 日暴雨产生的径流,在 9 月 6 日降中雨的补充下维持了 3 d),期间只有 4 d 产生径流,总径流深仅 3.8 mm。马尾松林集水区产生的径流深一直高于桉树林,两次较强降雨(1 次大雨和 1 次暴雨)产生的径流,在 3 次小雨和 2 次中雨的补充下一直延续到 9 月 13 日,期间的 13 d 都产生径流,总径流深达 10.1 mm,比桉树林的多 6.3 mm。由此可见,在非大暴雨的连续降雨条件下,马尾松林的水源涵养作用明显强过桉树林。这与马尾松林的林下植被较为稀疏、枯枝落叶层较厚及其土壤孔隙结构较好有关(表 1 和表 2),其穿透林冠的降水很容易随土壤入渗,再经土壤不透水层渗出至汇流沟一起产生径流,导致其径流历时较长和径流量较大<sup>[11]</sup>。

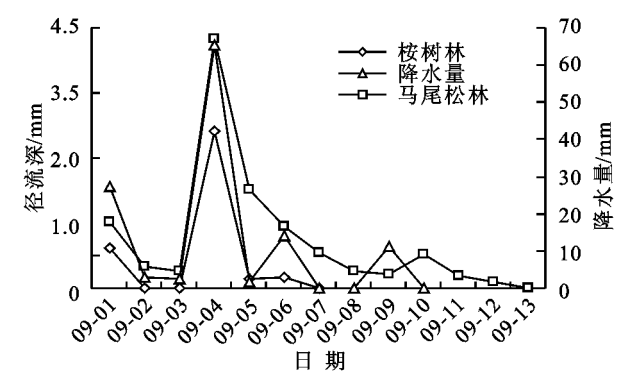


图 2 两种森林集水区径流深随降水量的逐日分布曲线

4 结论与讨论

森林植被的水文功能不仅表现在降雨产流上,而且还表现在降雨径流过程上,特别是对暴雨洪水的影响,森林植被的调蓄作用更为明显<sup>[16]</sup>。本研究选择地形相似且距离相近的两种森林集水区开展小河沟径流观测试验。结果显示,桉树林集水区的年径流深和径流系数分别为 107.7 mm 和 8.2%,马尾松林的依次为 319.4 mm 和 24.2%,两者相差十分悬殊。

小流域径流的滞后与延长,除受到植被覆盖特性的影响外,很大程度上还受降水特性、前期土壤水分含量、地形和土壤等多种因素的影响,尤其是当降水过程不同时,会出现不同的滞后效应<sup>[11,17]</sup>。本研究对一次强降雨过程(降水量 147.5 mm)的径流过程分析表明,在前期没有径流情况下,两种森林集水区的径流历时、径流最大值滞后于降雨峰值的时间和径流深都存在明显差异,桉树林的分别为 13.8 h、0.2 h 和 35.6 mm,马尾松林的依次为 35.5 h、0.7 h 和 28.5 mm。对一次连续 7 d 的降雨过程(降水量 125.0 mm)的径流过程分析表明,两种森林集水区的径流持续天数和径流深存在明显差异,桉树林集水区只产生 4 d 径流,径流深仅 3.8 mm;马尾松林集水区则连续产生 13 d 径流,径流深达 10.1 mm。

本文初步研究了桉树林和马尾松林自然集水区的径流量,并分析在强降雨和连续降雨影响下,这两种森林集水区的径流动态变化过程,但尚未对两种森林生态系统不同效应层次持留森林降水量及其再分配进行深入研究。今后,将从不同效应层次持留森林降水量及其再分配,并对比分析不同前期含水量、不同雨量条件下土壤水分收支变化的角度来探讨这两种森林集水区的径流特征及其径流过程,从而进一步揭示这两种森林的水源涵养机制,为森林可持续经营和管理提供科学依据。

参考文献:

[1] Calder I R. Forests and water-ensuring forest benefits outweigh water costs[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 251(1/2): 110-120.

[2] Wang Y H, Yu P T, Feger K, et al. Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China [J]. Ecohydrology, 2011, 4(2): 277-287.

[3] Josta G, Schumec H, Hagerc H, et al. A hillslope scale comparison of tree species influence on soil moisture dynamics and runoff processes during intense rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2012, 420: 112-124.

[4] 王金叶,李海防,段文军,等. 漓江上游典型森林群落内外降雨特征研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 56-59.

[5] 段文军,李海防,王金叶,等. 漓江上游典型森林植被对降水径流的调节作用[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 663-669.

[6] 李耀明,王玉杰,储小院,等. 降雨因子对缙云山地区典型森林植被类型地表径流的影响[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 244-249.

[7] 范世香,程银才,高雁,等. 考虑森林植被影响的小流域降雨径流模型[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2372-2379.

[8] Hümann M, Schüler G, Müller C, et al. Identification of runoff processes-the impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(3/4): 637-649.

[9] Neary D G, Ice G G, Jackson C R. Linkages between forest soils and water quality and quantity[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(10): 2269-2281.

[10] 周光益,陈步峰,曾庆波,等. 海南岛热带山地雨林短期水量平衡及主要养分的地球化学循环研究[J]. 生态学报, 1996, 16(1): 28-32.

[11] 王金叶,李海防,段文军,等. 漓江上游森林小流域径流过程及其影响因素[J]. 林业科学, 2013, 49(6): 149-153.

[12] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社, 1999.

[13] 欧阳竹,孙波,刘健. 陆地生态系统水环境观测规范[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2007.

[14] 中央气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 1979.

[15] 梁宏温,钟瀚涛,温远光,等. 不同造林抚育措施对桉树人工林坡面径流特征的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(11): 2020-2025.

[16] 魏晓华,李文华,周国逸,等. 森林与径流的一致性与复杂性[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 127-136.

[17] 王小明,周本智,钟绍柱,等. 不同降雨条件下天然次生林水文过程动态分析[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2010, 36(6): 57-60.