

## 坡面尺度林地植被对地表径流与土壤水分的影响初步研究

肖金强, 张志强, 武 军

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:**通过定位观测以及对两个天然坡面有林地径流场和无林地径流场进行对比,以 2003 年、2004 年实测的降雨、径流数据分析研究区域内降雨特性、地表径流产生的过程和机制,并结合 1996~1998 年相关数据,初步研究了林地植被对地表径流的影响。结果表明:无论是有林地还是无林地,地表径流系数随降雨量增大而增大。有林地径流系数小于对应的无林地径流系数。植被对地表径流有不同程度的削减作用,径流削减率与降雨量大小并不是单一的线性(递增、递减)关系:当降雨量小于 73.04 mm 时,植被对地表径流系数的削减率随降雨量增加而增加,当降雨量大于 73.04 mm 时,植被对地表径流系数削减率随降雨量增加降低。植被能够削弱地表径流的峰值,延缓峰值出现的时间,使得径流历时加长。植被对地表径流削减率的大小和降雨量大小关系不是单一的线性(递增、递减)关系:当降雨量小于 73.04 mm 时,植被对洪峰的削减率随降雨量增加而增加,当降雨量大于 73.04 mm 时,植被对洪峰的削减率随降雨量增加而呈总体下降趋势。以 2004 年为例,比较有林地与无林地在三种相同坡位情况下的土壤含水量大小关系,结果:坡上位土壤水分有林地大于无林地,而坡下、坡中无林地土壤水分大于有林地。说明林地植被能够拦蓄、调节径流,起到涵养水源、在空间和时间上合理配置土壤水分、提高生态效益的作用。

**关键词:**坡面;林地植被;地表径流;土壤水分;影响

**中图分类号:**S152.7;S714

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2006)05-0227-05

## Preliminary Study of the Influence of Vegetation in Natural Forested Land Runoff Plots Slope on Ground Runoff

XIAO Jin-qiang, ZHANG Zhi-qiang, WU Jun

(Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** By means of sites measurement and comparison, using the data of precipitation and runoff measured continuously in 2 years (2003, 2004), the rainfall characteristic and ground runoff generation mechanism are analyzed, together with the relative data in the year 1996~1998. Preliminary study about the influence of vegetation on ground runoff is carried out. The results show that ground runoff coefficient increases with rainfall, the ground runoff coefficient of forested land is less than that of non forested land. Vegetation can reduce the ground runoff coefficient more or less. Reduction rate of runoff coefficient is not single linear to rainfall: when rainfall < 73.04 mm, reduction rate of runoff increases with rainfall; rainfall > 73.04 mm, it decreases with rainfall. At the same time, vegetation can reduce the flood peak, postpone the appearance of flood peak, prolong the runoff period as well. The flood peak reduction is not single linear to rainfall: rainfall < 73.04 mm, reduction rate of flood peak increases with rainfall; rainfall > 73.04 mm, it decreases with rainfall. The data of soil moisture in 2004 shows that the forested vegetation has an obvious effect on absorbing and preserving water, as well as improving the ecology benefit.

**Key words:** runoff plots slope; forested land vegetation; ground runoff; soil moisture; influence

地表径流反映了流域的植被、土壤气候等水文特征是森林水文的一个重要内容,作为一项重要的研究指标日益受到重视。植被状况影响地表径流是森林实现涵养水源、保持水土、削减洪峰和洪水量、减少泥沙输送量等生态水文功能的重要环节。同样,植被状况影响土壤水分动态变化规律也是一个热点,至今已有许多种定性、定量方法来确定林地植被对地表径流系数、径流量的影响研究<sup>[1~9]</sup>。本文通过定位观测,以坡度、土壤、降雨量等条件相同的有林地坡面径流场及其对照无林地坡面径流场为研究对象,定量地分析了林地植被对地表径流产生、地表径流系数、洪峰流量的削减作用,以

及三种不同坡位的土壤水分差异,凸显出植被对林地地表径流和土壤含水量的影响效应。

### 1 天然坡面径流场概况及土壤水分观测方法

天然坡面径流场位于密云水库库东,北庄乡林业站前,为研究密云水库水源保护林的水土保持效益,于 1991 年兴建。这两个坡面径流场自然条件很相似,将其中一个(坡向朝西)的刺槐林地采伐掉作为另一个的对比。而且每年在植被还没有萌孽的早春季节要对其进行割灌处理。两个坡面径流场都在坡脚和汇流出口处设有汇流渠,集水池,以及薄壁的 900 三

\* 收稿日期:2005-10-14

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(6032017);国家自然科学基金资助项目(30271044)

作者简介:肖金强(1979-),男,河北唐山人,硕士在读,研究方向:流域管理、森林水文、流域水文模型。

角量水堰和能进行流量过程的测量记录的自记水位计。

两个天然坡面径流场坡面都比较平整,坡脚处的汇流渠对原始坡面的自然状况影响不大,可以忽略,具体情况见表 1。

表 1 小南沟天然坡面径流场基本情况和试验布设

小南沟天然坡面径流场基本情况和试验布设		
试验区名	有林地	无林地
集水区编号	XY	XW
林分区或地类	刺槐薪炭林	采伐迹地
集水区面积/hm <sup>2</sup>	0.91	0.95
处理措施	原样(枯落物量 22.0 t/hm <sup>2</sup> )	皆伐、清除枯落物,雨季前地被物清除
主要植被	8~10年生刺槐林,郁闭度为 92%,下层植被为柞条、狗尾草、苔藓等	同龄刺槐林皆伐迹地(2~3年),主要植被为柞条、狗尾草和艾蒿。覆盖度为动态变化(30%~70%)
坡向	E	W
坡度/°	25~30	22~28
土壤类型	山地沙壤土	山地沙壤土
土层平均厚度/cm	34	38
土壤平均容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.34	1.45
岩石种类	花岗岩、片麻岩	花岗岩、片麻岩
量水堰类型	90°三角形薄壁量水堰	90°三角形薄壁量水堰
试验设施布设	自记水位计、雨量计	自记水位计、雨量计

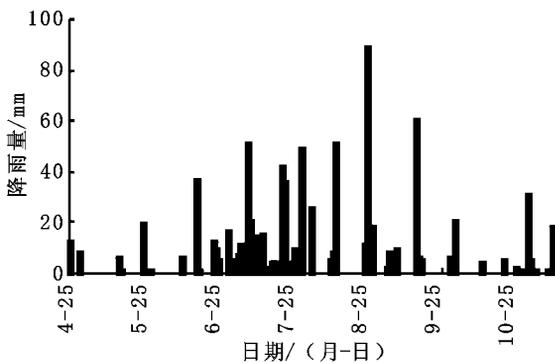


图 1 2003 年天然坡面径流场降雨量分布图

表 2 研究期间不同雨量级的降雨量及次数统计

降雨标准	降雨量级 / (mm·次 <sup>-1</sup> )	2003 年			2004 年		
		次数	降雨量/mm	占总观测/%	次数	降雨量/mm	占总观测/%
小雨	0~5	35	52.5	13.08	32	41.2	5.00
	5~10	5	34.7	8.65	16	110.4	13.40
中雨	10~15	4	50.6	12.61	6	90.4	10.97
	15~25	5	86.4	21.53	6	113.4	13.77
大雨	25~35				2	56.1	6.81
	35~50	3	120.6	30.05	4	162.3	19.70
暴雨	50~70	1	56.5	14.08	3	161.7	19.63
	70~100				1	88.3	10.72
大暴雨	100~200						
特大暴雨	>200						
合计		53	401.3	100	70	823.8	100

### 2.2 坡面径流形成的过程和机制

地表径流形成与降雨(降雨量、降雨强度)、植被状况(林冠截留、地被物和枯落物的持水量)以及土壤的物理性状(土壤前期含水量、孔隙度)等因子密切相关。降雨因子是地表径流产生的第一动因。一般地说,降雨量越大,地表径流量越大;相同雨量情况下,降雨强度越大;地表径流越易产生。

根据实测的降雨、径流数据,选取 2004 年 7 月 22 日和 8 月 25 日两场较大的产流降雨及其径流数据,绘制降雨径流过程图,如图 3、4。

在两个天然坡面径流场各设一条观测样线。按照不同的坡位(上坡、中坡和下坡),取土壤深度分为 0~10 cm,10~20 cm,20~30 cm 三个层面,利用土钻法(每个样点取三次,取其平均值)每 10 天取土样一次,雨后加取一次,并在室内进行测定。

## 2 研究方法

### 2.1 降雨特性分析

图 1、2 是 2003、2004 年研究期间降雨量分布图。可以看出,2003 年、2004 年降雨量的年际和年内的变化,降雨量年内分布不均匀,且年际变化十分显著,2003 年实测总降雨量仅 401.3 mm,分布不均匀,最大场降雨量出现在 8 月 27 日的 56.5 mm,而 2004 年实测降雨量 823.8 mm,且分布比较均匀,最大场降雨量出现在 8 月 25 日,达到了 88.3 mm。

根据北京地区降雨的划分标准(《北京自然地理》,1988),统计 2003、2004 年试验研究区的降雨量级别,结果见表 2。

从表 2 中看出 2003 年全年没有暴雨发生,最大场降雨量只有 56.5 mm,占研究期间总降雨量的 14.08%,2004 年有 4 场降雨达到暴雨标准,暴雨总量占研究期间内总降雨量的 30.35%,其中,最大的一场暴雨雨量为 88.3 mm,占研究期间内总降雨量的 10.72%。

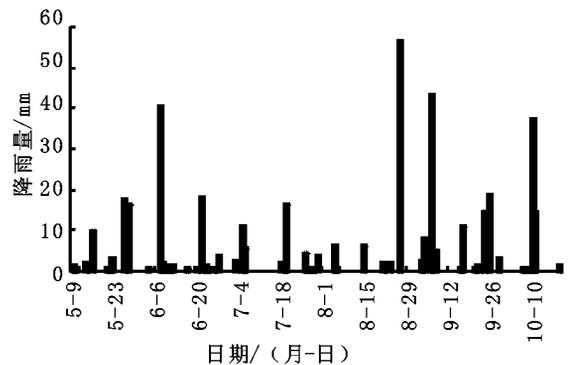


图 2 2004 年天然坡面径流场降雨量分布图

由以上两图以及参考以前的数据结果,可以总结出研究区域,在研究期间的降雨、径流具有以下特点:坡面产流与降雨场次一致,无基流,而且径流过程与降雨强度分布相对应,但径流的峰值(洪峰)一般较降雨强度峰值滞后,径流过程陡涨陡落,径流过程线起伏很大。

在单场降雨中,降雨主峰偏后比主峰靠前,更容易形成径流洪峰。2004 年 7 月 22 场降雨主峰在后,主峰值、次峰值降雨强度分别是 59.4 mm/h,45.6 mm/h,峰值径流量分别是无林地 96.24 L/s,有林地 58.39 L/s。而 2004 年 8 月 25 日场降雨主峰在前,主峰降雨强度分别为 57.6 mm/h,37.8 mm/h,峰值径流量分别是无林地 1.34 L/s,有林地 0.78 L/s。相比较而言,降雨主峰偏后更容易形成较大的洪峰流量,这对削弱洪峰而言是不利的。

降雨历时长,且前期降雨条件充分,降雨形成的径流过程的退水过程线持续时间较长,2004 年 7 月 22 日的降雨之前的 5 天研究区累积降雨量达到了 53.1 mm,7 月 21 日一天的降雨量就高达 42.1 mm,所以,土壤湿度很大,在 7 月 22 日降雨发生的同时,天然坡面径流场的坡脚处出现回归流,有效的延长了径流的退水过程历时。这场降雨形成的径流过程退水过程持续了 48 h 多。

地表径流的形成与前期雨量积累即土壤的水分状况、土壤的入渗强度、降雨量、降雨强度都有着密切的关系。在研究区域内,坡面地表径流产生,以超渗产流机制为主<sup>[8]</sup>,而出现雨量主

峰偏后对洪峰形成有利的现象,充分说明,蓄满产流即饱和地表

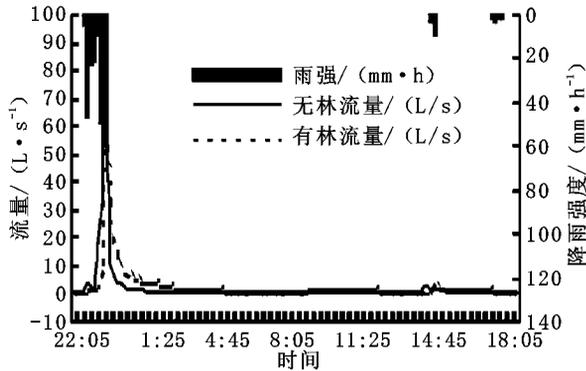


图 3 2004 年 7 月 22 日天然坡面径流场降雨径流过程

产流也在该区域地表径流形成过程中占一定的比重。

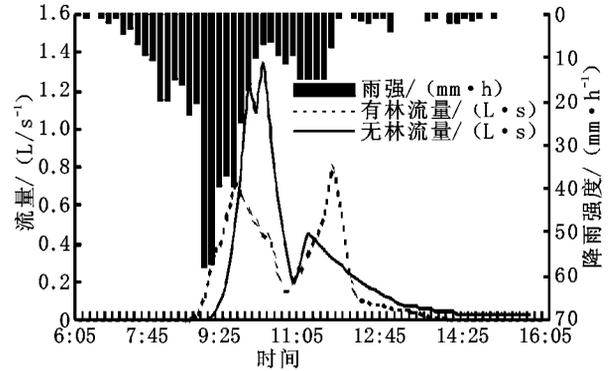


图 4 2004 年 8 月 25 日天然坡面径流场降雨径流过程

### 3 结果与分析

#### 3.1 林地植被对地表径流的影响

影响地表径流的因子除了降雨这个最重要的因素外,主要是植被和林地土壤。在本文中,造成有、无林地地表径流差异的第一主导因子无疑是植被因子。前面的降雨径流过程线也直观的显示:在绝大多数情况下,有林地地表径流小于无林地地表径流。以下将结合 1996~1998 年的部分数据资料,将五年(1996~1998 年、2003~2004 年)的降雨、径流数据进行汇总,针对林地植被(刺槐)影响地表径流,从影响径流深(径流系数)和对洪峰的削减两个方面做定量分析。

##### 3.1.1 林地植被对场降雨地表径流深和径流系数的影响

地表径流系数是反映一个地区的降雨量有多少形成了径流,它综合反映了一个地区内地质和植被状况对降雨与径流关系的影响。

张志强<sup>[5-8]</sup>研究表明,在本试验区当降雨量小于 30 cm 时,天然坡面径流场不管是有林地还是无林地,地表径流深都很小,特别是有林地。而且一般认为,本试验区地表产流的降雨临界值是 10 cm,即当降雨量小于 10 cm 时没有地表径流发生。为了更详尽的阐明林地植被(刺槐)对地表径流深和径流系数的影响,将 5 年(1996~1998 年、2003~2004 年)降雨量大于 40 cm 的降雨径流数据进行汇于表 3。

表 3 对比天然坡面径流场降雨 > 40 mm 对应的径流量统计表

降雨径流 编 号	总降雨量 /mm	总径流深/mm		径流系数/%		林地径流 削减率/%
		有林	无林	有林	无林	
19970731	140.85	107.78	115.63	76.52	82.09	6.79
19970719	117.3	8.55	3.66	7.29	3.12	-133.63
20040722	86.2	24.62	25.96	28.56	30.11	5.15
19980705	73.04	2.06	19.30	2.82	26.43	89.34
20040825	88.3	0.88	1.73	1.00	1.96	49.15
19960730	68.4	0.90	1.79	1.32	2.62	49.62
20030827	56.5	0.12	0.28	0.22	0.49	56.12
20030907	43	4.58	7.79	0.41	0.69	41.21
20040914	59.6	0.05	0.29	0.09	0.49	81.48
19980617	48.05	0.42	0.94	0.87	1.95	55.36
19960618	44.72	0.68	0.87	1.51	1.94	22.01
19960809	43.2	1.87	1.75	4.34	4.04	-7.31
19960911	42.6	1.06	2.92	2.48	6.86	63.84

两个天然坡面径流场的集水面积不同,用有林地和无林地的地表径流系数做对比,来反映林地植被对地表径流的影响。森林植被对地表径流的削减率可定义为:

$$\text{林地地表径流削减率} = \frac{\text{无林地径流系数} - \text{有林地径流系数}}{\text{无林地径流系数}}$$

由表 3 可知:除了 1996 年 8 月 9 日、1997 年 7 月 19 日、2003 年 10 月 10 日三次降雨过程有林地地表径流系数大于无林地地表径流系数之外,其余绝大多数产流降雨过程的地表径流系数,有林地的均小于无林地。说明有林植被(刺槐)对地表径流有不同程度的削减作用,削减率在 5.15%~89.34%。地表径流削减率与降雨量大小并不是单一的线性关系。

出现负削减现象即造成 19970719 号降雨有林地地表径流深大于无林地地表径流深的原因是 1997 年在此之前没有明显的降雨过程,土地比较干旱,而且春季的割灌对无林地地表有比较明显的扰动,割倒的灌木没有被完全清除,使得无林地地表糙率增大,增加了地表的入渗强度<sup>[5,6]</sup>。有林地对地表径流削减效果最明显出现在降雨量为 73.04 mm 的 19980705 号降雨。最小削减率出现在 200407022 号降雨,因为在此次降雨之前研究区域内前五天都有降雨,且前一天的降雨量达到了 42.1 mm,可以说,前期土壤水分十分充足,林地植被对地表径流的拦蓄和储水潜力已经接近饱和状态,所以在 7 月 22 日的降雨过程中,林地植被(刺槐林)不能继续有效的拦蓄地表径流,致使其削减地表径流系数效果不明显。

前面介绍了,两个天然的坡面径流场的自然状况基本一致,坡度、土壤物理性状等条件都不作为影响地表径流的因子,很明显植被才是造成有林地与对比无林地地表径流差异的决定因子。研究坡面植被对径流的影响,可以对比同一场降雨,两个径流场的对应径流深(径流系数),图 5 显示了降雨量大于 40 mm 时,有林地径流系数与无林地径流系数对应关系。

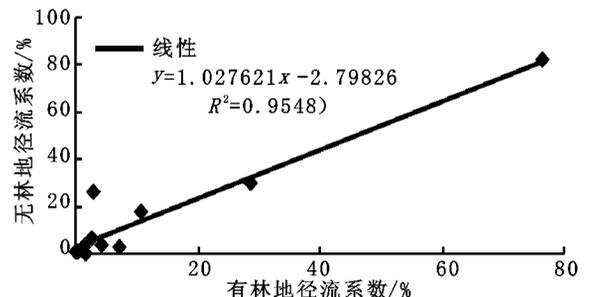


图 5 有林、无林坡面径流场径流系数对比

对表 3 中有林地和无林地两组径流系数数据作回归统计分析,得到回归直线方程:  $Y = 1.027621X - 2.79826$ ,  $R^2 = 0.9548$ 。该方程与  $Y = X$  的偏离程度可视为林地植被对径流的影响大小。

由 2003~2004 年实测的径流系数数据看,小降雨量(< 30 mm)时,不产生有意义的地表径流,且径流系数非常小,一般不足 5%,有林地甚至不产流,径流系数为 0;降雨量小于 80 mm 时,径流系数还都很小,一般低于 10%。

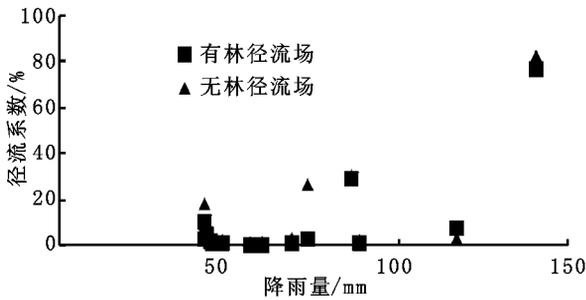


图 6 径流系数随降雨量变化图

从图 6 看出,降雨量大于 40 mm 时,无论是有林地径流场,还是对照无林地径流场,径流系数与降雨量均成正相关关系,有、无林地径流场降雨量与径流系数线性方程分别是:  
 $Y = 0.6723X - 34.46553, R^2 = 0.845971$ ;  $Y = 0.6986X - 31.9855, R^2 = 0.829795$ 。径流系数随降雨量增大而增大。

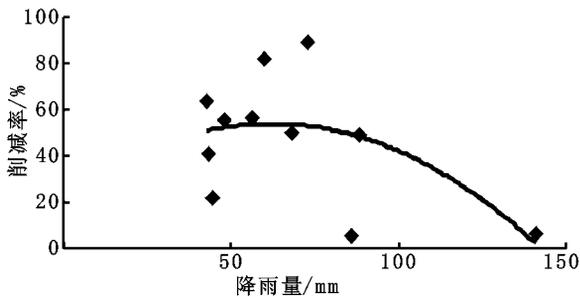


图 7 天然坡面径流场林地植被(刺槐)对径流系数的削减率随降雨量变化的散点图

天然坡面径流场林地植被(刺槐)对地表径流系数的削减率随降雨量变化的散点图如图 7 所示:当降雨量小于 73.04 mm 时,林地植被对地表径流系数的削减率随降雨量增加而增加,当降雨量大于 73.04 mm 时,林地植被对地表径流系数削减率随降雨量增加而总体上呈下降趋势。

### 3.1.2 林地植被对地表径流洪峰流量的影响

洪峰流量作为森林植被影响水文循环的重要指标,不仅可以揭示森林对洪水径流的影响,同时对评价土壤侵蚀十分重要,形成洪峰流量的地表径流对于我们研究的天然坡面径流场的土壤侵蚀影响是十分明显的。由图 3、4 可以看出,有林地这两场降雨的径流峰值都低于无林地的径流峰值,而且林地径流过程变化曲线比无林地径流过程变化曲线要平缓,这些说明林地植被能够削弱地表径流的峰值,延缓峰值出现的时间,使得径流过程历时加长。所以,研究林地植被对地表径流的作用,还可以从其对洪峰流量的削减作用上考虑,森林植被对洪峰流量的削减率可定义为:

$$\text{林地洪峰削减率} = \frac{\text{无林地洪峰流量} - \text{有林地洪峰流量}}{\text{无林地洪峰流量}}$$

除了 1996 年 7 月 30 日、1996 年 8 月 9 日两场降雨外,其余的降雨产流过程中,有林地地表径流最大洪峰流量都小于无林地,这些数据都说明林地植被(刺槐)对地表径流有不同程度的削减作用,削减率在 8.11% ~ 67.82%。造成 199600730 号、19960809 号两场降雨径流过程洪峰流量有林地大于无林地的原因是降雨的不均匀性,以及雨型的不同、土壤的前期含水量的积累差异造成了产流机制的转化或并存。以 19960809 号为例说明,有林地的入渗、蓄水能力强,无林地由于保水性能差,蓄水能量小。在此次降雨发生之前,天然坡面径流场内前期降雨量比较多,有林地蓄水几乎达到了饱和,土壤水分十分充足,而无林地尚有蓄水空间,在 19960809 号降雨过程中,有林地内降雨绝大部分形成了地

表径流,而无林地相对拦蓄了更多的雨量,致使有林地洪峰流量高于无林地洪峰流量。

表 4 对比天然坡面径流场降雨 > 40 mm 对应的洪峰流量实测成果表

降雨径流 编 号	总降雨量 / mm	最大洪峰流量/(L·s <sup>-1</sup> )		林地洪峰流量 削减率/%
		有林径流场	无林径流场	
19970731	140.85	87.51	160.84	45.59
19980705	73.04	2.54	7.29	65.14
20040825	88.3	0.78	1.34	41.88
19960730	68.40	1.76	1.64	- 6.858
20030827	56.5	2.44	5.56	56.12
20030907	43	4.58	7.794	41.24
20040722	86.2	58.4	96.24	39.32
19980617	48.05	1.78	3.85	53.75
19960618	44.72	0.68	0.74	8.11
19960809	43.20	1.89	1.69	- 11.43
19960911	42.60	6.43	19.97	67.82

注:20030827 号、20030907 号无林地洪峰流量漏测,最大洪峰流量用总流量(m<sup>3</sup>)代替。

从表 4 中不难看出林地植被(刺槐)对地表径流削减率的大小和降雨量大小关系并不完全不一致;天然坡面径流场林地植被(刺槐)对洪峰流量的削减率随降雨量变化的散点图如图 8 所示:当降雨量小于 73.04 mm 时,林地植被对洪峰的削减率随降雨量增加而增加,当降雨量大于 73.04 mm 时,林地植被对洪峰的削减率总体上随降雨量增加而呈下降趋势。

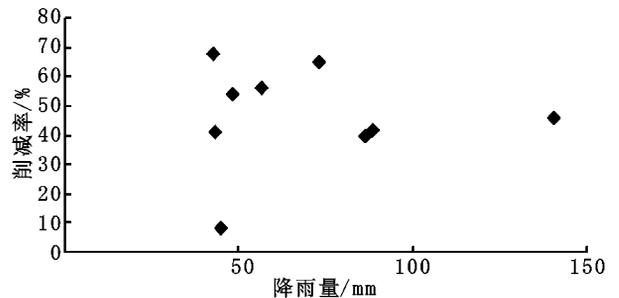


图 8 天然坡面径流场林地植被(刺槐)对洪峰流量的削减率随降雨量变化的散点图

### 3.2 林地植被对土壤水分的影响

国内外绝大多数的森林植被对水文生态效应研究认为森林的减少可以增加流域年产量水[8~12]。森林植被可以有效地减少地表径流量、增加林地储水能力,进而调控土壤水分的时空分配。根据 2004 年实测的有、无林地不同坡位的土壤水分数据绘制同一坡位(上、中、下)有、无林地土壤水分的对比图,土壤水分数据是 0~30 cm 土层的平均含水量。

在坡面的坡上位,6 月 9 日之前,由于此期间的降雨对土壤水分补给少,且有林地植被蒸腾消耗大量土壤水分,而无林地的土壤蒸发强度相对较小,使得有林地土壤含水量低于无林地。而当第一场较大的降雨(6 月 8 日)过后,有、无林地土壤都得到了补给,水分开始不同程度增加,而在海拔较高的坡上位,风速较大,对坡面土壤产生了两方面的影响,导致无林地坡上部的土壤侵蚀(风蚀、水蚀)严重,理化性质恶化,土壤瘠薄、保持水土的能力下降。有林地上的植被显然能起到较强的涵养水源、保持水土、调节径流量、控制侵蚀的作用,使得水分流失较少。总体上,有林地坡上位比无林地坡上位的土壤含水量高。

有林地坡上位的植被在涵养水源、拦蓄、调节径流过程之中,增加了水分下渗量、减少水分蒸发损失,减缓水流向海拔低的位置运动的速度,延长了水分再分配时间。而无林地

坡上位的水分几乎没有被拦蓄就直接运输到坡中、坡下,使得无林地坡中、下位比有林地坡中、下位的土壤含水量高。

经计算发现,2002 年、2003 年有林地与对照无林地土壤水分的差异情况和 2004 年基本相同。

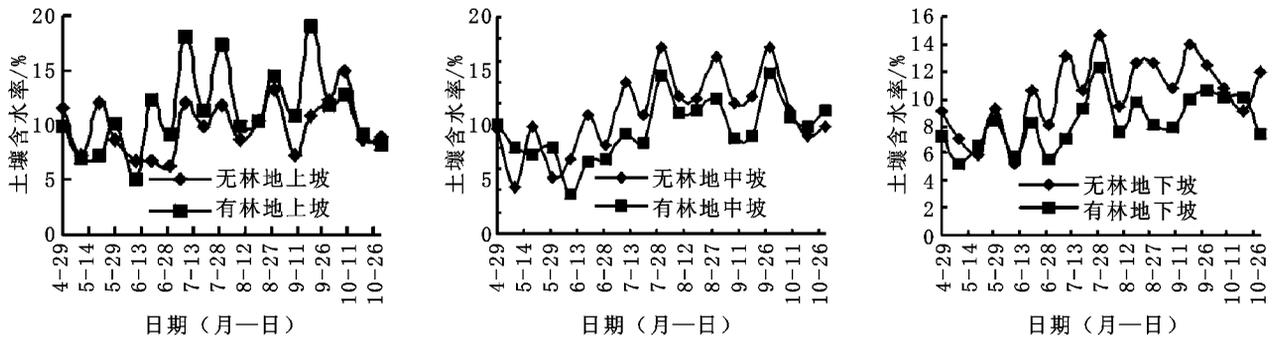


图 9 2004 年有林地与对照无林地在相同坡位土壤水分的差异(上、中、下)

### 4 结 论

(1) 研究区内,天然坡面径流场地表径流形成机制以超渗产流为主,同时伴有饱和产流(蓄满产流)。径流的产生与降雨的类型、雨量大小、雨强大小、降雨历时、土壤前期含水量、土壤的物理性状(质地、粒径结构)、坡面坡度、坡面有效糙率以及水分下渗强度有密切的关系。

(2) 坡面径流场森林植被对地表径流的影响:植被是造成有林地与对比无林地地表径流差异的决定因子,植被的存在使得林地地表有效糙率提高,同时植被的根系改良土壤结构提高起入渗强度和蓄水性能,进而有效地拦蓄径流。当降雨量不足 30 mm 时,地表一般不产生有意义的径流,径流系数非常小,不足 5%,有林地甚至不产流,径流系数为 0。降

雨量小于 80 mm 时,径流系数还都很小,一般低于 10%。当降雨量大于 40 mm 时,无论是有林地还是对照无林地,地表径流系数随降雨量增大而增大。

(3) 林地植被能够削弱地表径流的峰值,延缓洪峰流量出现的时间,使得径流过程历时加长。林地植被(刺槐)对地表径流削减率的大小和降雨量大小关系并不完全一致:当场降雨量小于临界值(73.04 mm)时,林地植被对洪峰的削减率随降雨量增加而增加,当降雨量大于该临界值时,林地植被对洪峰的削减率总体上随降雨量增加而呈下降趋势。

(4) 林地植被储水是一个动态过程,这个动态过程能够涵养水源、拦蓄、调节径流过程,有效的调控土壤含水量,增加土内径流,在干旱时补充基流。林地植被动态储水的过程有助于林地生产力以及生态效益的提高。

### 参考文献:

[1] 黄志霖,李建新,王玉. 太行山侧柏人工林林冠降雨截留及地表径流的研究[J]. 河南林业科技, 2000, 20(2): 1 - 5.

[2] 闫俊华,周国逸,申卫军. 用灰色关联法分析森林生态系统植被状况对地表径流系数的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(3): 197 - 200.

[3] 周国逸,余作岳,彭少麟. 小良试验站三种植被类型地表径流效应的对比研究[J]. 热带地理, 1995, 15(4): 306 - 312.

[4] 韦炳武. 从森林植被的内部结构分析影响地表径流的主导因子[J]. 林业科技, 1996, 21(5): 12 - 14.

[5] Zhang, Z Q, Qin, Y S, et al. Water conservation forest impacts on the runoff generation and sediment at small watershed scale in Miyun Reservoir watershed[J]. J. Beijing Forestry University, 1998, 7(1): 86 - 92.

[6] Yu, X X, Zhang, Z Q, et al. Water conservation forest impacts on the runoff generation and sediment at natural slope scale in Miyun Reservoir watershed[J]. J. Beijing Forestry University, 1998, 7(1): 8 - 14.

[7] 张志强,王礼先. 水力侵蚀与植被变化关系研究途径与展望[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(增刊 1): 177 - 180.

[8] 王礼先,张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 1998, 6: 15 - 23.

[9] 陈军锋,李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 474 - 480.

[10] 张志强. 森林水文:过程与机制[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.

[11] 王礼先. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社, 1995.

[12] 于志民,王礼先. 水源涵养林效益研究[M]. 北京:中国林业出版社, 1999.

(上接第 226 页)

面均为 5.0 m。桩顶下 1 m 处设 130 锚杆两道,锚杆水平倾角 15~20°,锚入中风化基岩面不小于 4.0 m~4.5 m。锚杆钢筋采用 3 32 或 3 25,锚固材料为 M30 锚固砂浆。锚杆自由段防腐应特别加强,采取沥青纤维布包扎两道再进行灌浆。对于部分公路条石挡墙已有变形迹象,采用锚杆对其进行加固处理,安全系数取 k=1.3。锚杆间距 4 m x 4 m,孔径 130,水平倾角 20°。锚杆材料为 3 25 普通螺纹钢,锚杆锚入中风化基岩 4.0 m。

### 参考文献:

[1] 重庆南江水文地质工程地质队. 长江三峡工程库区重庆市万州区石包嘴滑坡防治工程地质勘察报告[R]. 2002.

[2] 重庆市地方标准, DB50/ 5029 - 2004, 地质灾害防治工程设计规范[S].

### 5 结 语

三峡库岸滑坡治理工程有其特殊性,不仅要受到降雨的影响,还要受库水位变动、塌岸、移民迁建等因素的影响,所以治理工程的实施要综合考虑这些因素,进行多种工况下的滑坡稳定性分析。水是诱发滑坡的一个重要因素,滑坡治理中必须采取有效措施来减少水的影响。另外,支挡措施如抗滑桩、锚杆等是目前滑坡治理中用的最多也是最有效的。