

151-157

第18卷第2期  
1998年3月生态学报  
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 18, No. 2  
Mar., 1998

## 黄土高原油松林地产流产沙及其过程研究\*

吴钦孝 赵鸿雁 汪有科

中国科学院  
水利部水土保持研究所 陕西 杨陵 712100

5781.254

**摘要** 通过对径流小区的多年观测和人工模拟降雨试验,利用自制的径流自动记录装置,研究了油松林地不同处理的产流产沙及其动态过程。研究结果表明,油松林地、林地去枯枝落叶层和采伐林地上层林木等3种处理与农地比较,分别减少径流量88.0%、27.0%和87.8%,减少产沙量99.9%、98.0%和99.8%。产沙量与坡度和雨强关系密切,随坡度和雨强增加而迅速增加,以雨强的效应更甚。

油松林地开始产流的降雨量一般在10mm以上。由于降雨过程不均和地面多种因子的综合作用,产流过程常为一双峰或多峰曲线,产流时间较农地滞后,持续时间较农地长。上述3种处理较农地产流滞后和持续延长的时间分别为15min和60min,0min和10min,10min和40min。

油松林地的产沙过程并不平稳,即使在人工均匀降雨的条件下,通常初期产沙较多,以后随时间递减。据对产沙资料的分析,其累积产沙量( $R$ )随时间( $t$ )的变化符合幂函数方程:

$$R = a + bt^c$$

在设计雨强1.0mm/min(实际雨强0.94mm~1.10mm/min)条件下,油松林地10°和20°坡度的累积产沙方程为:

$$R_{10} = 0.260 + 0.176t^{0.509} \quad r = 0.997$$

$$R_{20} = -0.441 + 0.372t^{0.205} \quad r = 0.997$$

**关键词:** 黄土高原,油松林,产流产沙。

## FLOW PRODUCTION AND SEDIMENT PRODUCTION AND THEIR PROCESSES IN CHINESE PINE WOODLANDS IN THE LOESS PLATEAU

Wu Qinxiao Zhao Hongyan Wang Youke

(Institute of Soil and Water Conservation, The Chinese Academy of Sciences  
and the Ministry of Water Conservancy, Yangling, Shaanxi, 712100, China)

**Abstract** The flow production and sediment production and their processes were studied in the paper based on the data from observation in runoff plots for many years and from simulated rainfall experiment, using an automatic runoff recording instrument made by ourself. The results showed that, compared with farmland, the runoff in chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) stand, the stand without litter and in its cutover area with all vegetation

\* 国家“九五”科技攻关资助项目(96-017-01-08和96-007-04-06)。

收稿日期:1995-08-09,修改稿收到日期:1996-09-04。

under the stand decreased by 88.0%, 27.0%, 87.8% respectively, and the soil loss reduced by 99.9%, 98.0%, 99.8% respectively. The sediment yield was closely correlated with slope and rainfall density. It increased with slope and rainfall density, but the effect of the latter was more obvious than that of the former.

More than 10mm rainfall usually was need for flow prouction in chinese pine stand. Because of uneven rainfall process and comprehensive effect of factors on woodland the flowproduahy process often shows up as a twin-or multipeak curve. The flow production time on the woodland started later, and its duration was longer than on farmland. By comparison, in the above three treatments of Chinese pine stand and farmland the starting time of flow production was 15 min, 0 min and 10 min later, respectively. The flow duration was 60 min, 10min and 40min longer, respectively.

Under the condition of simulated even rainfall the sediment producing process on chinese pine woodland did not even. Usually at the begining sediment yields were comparatively more, then it gradually decreased with time. According to the analysis at the date of observation the changes in accumulative sediment yield ( $R$ ) with time ( $t$ ) conformed top-power function;  $R=a+bt^c$

Under the conditions of projecting rainfall intensity 1.0mm/min(actual rainfall density 0.94~1.10mm/min)the equations of accumulative sediment yield on chinese pine woodland with the slopes of 10°and 20° were as follows:

$$R_{10} = -0.260 + 0.176t^{0.500} \quad r = 0.997$$

$$R_{20} = -0.441 + 0.372t^{0.905} \quad r = 0.997$$

**Key words:** Loess Plateau, *Pinus tabulaeformis* stand, flow production, sediment production.

## 1 试验区自然概况

试验区设在宜川县铁龙湾林场的松峪沟,海拔1000~1200m,年平均气温9.7℃,平均降水量574mm。植被属暖温带落叶阔叶林,天然植被已遭破坏,现阳坡主要分布有狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、山桃(*Prunus davidiana*)等,阴坡多为山杨(*Populus davidiana*)林。

试验油松(*Pinus tabulaeformis*)林为黄土高原早期(60年代中)所栽植,林分高10~11m,胸径11~12cm,郁闭度0.7,具代表性。林分较郁闭,林下有少量灌木和草本植物,覆盖度0.2,枯枝落叶层厚3~4cm。

## 2 研究方法

试验采用国内外目前进行水土流失研究常用的方法,即林内设置径流观测小区,并结合人工模拟天然降雨试验。

径流小区面积5m×20m,坡度21°,土壤为灰褐土。林下植被由灌木黄刺玫(*Rosa xanthina*)和草本植物大披针叶苔草(*Carex lanceolata*)组成。径流小区内对油松林分别作如下处理:原状油松林(a),林地去枯落物层(b),采伐林地上层林木,但保存林下灌木和草被(c),采伐后开垦为农地(d),各处理均设一个重复。每次降雨后,利用自制的坡面径流自动记录装置\*,记录产流过程,同时测定林地降雨量、降雨历时、径流量和泥沙量。

\* 该装置已获国家专利,为无电源地区记录林草地径流过程提供了新型仪器,专利号:ZL 92 2 44884.1

人工模拟天然降雨采用水土保持研究所研制的组合侧喷式野外人工降雨装置,降雨时两侧喷头座架之间距离为7m,喷头高8m,喷头出水高度1.5m,使降雨雨滴终点速度基本接近天然降雨的速度,供水压力由压力表控制,雨强主要通过孔板的孔径来调节。

人工降雨试验小区长4m,宽1m,小区出口处连接分水箱和贮水箱,小区坡度可任意调节,本次试验根据黄土高原森林分布的常见坡度,分别设计了10°、20°和30°等3个坡度;模拟该地区常见天然暴雨雨强,设计了1.0mm/min、1.5mm/min和2.0mm/min 3个降雨强度,小区内设计有两种处理,即油松林和作为对照的农地。油松高6m,郁闭度0.7。

### 3 结论和分析

#### 3.1 产流量和产沙量

据1988~1994年雨季(6~9月)对径流小区的连续6a观测(1989年因雨季降水少、强度小,基本未产流),油松林地的产流产沙状况见表1。

表1 油松林不同处理的产流产沙量比较

Table 1 Comparison of flow and sediment yield between different treatments of *P. tabulaeformis* stand

处理 Treatment		年份 Year						平均 Average
		1988	1990	1991	1992	1993	1994	
雨季降雨量(mm)		435.3	408.7	274.5	367.5	418.8	304.1	
I Precipitation in raining season								
油松林 <i>P. tabulaeformis</i> stand	径流深* (mm)	1.90	1.86	2.38	3.28	2.61	2.04	2.35
	泥沙量** (mm,t/km <sup>2</sup> )	2.72	2.35	5.75	0.81	0.63	0.19	2.07
林地去枯落物层 Stand without litter	径流深(mm)	4.85	31.86	8.07	18.89	18.18	3.77	14.27
	泥沙量(mm,t/km <sup>2</sup> )	63.24	181.79	23.06	54.62	16.90	2.45	57.01
采伐林地上层林木 Cut-over area	径流深(mm)	1.81	1.87	3.15	3.65	1.80	2.01	2.38
	泥沙量(mm,t/km <sup>2</sup> )	18.56	6.62	4.35	2.39	1.44	0.17	5.59
农地 Farmland	径流深(mm)	13.18	29.41	20.79	34.17	15.37	4.42	19.56
	泥沙量(mm,t/km <sup>2</sup> )	309.96	6778.76	4076.80	5967.17	177.63	84.83	2899.19

\*:径流深,Runoff depth、\*\* :泥沙量,Sediment depth.

从表1中可以看出,在地形、土壤、降水条件相同的条件下,油松林地的蓄水减少效果显著,6a合计,地表径流深14.07mm,为农地的12.0%,土壤流失量12.45t/km<sup>2</sup>,不足农地的0.1%,也就是说,林地与农地相比,可减少径流88.0%,减少泥沙99.9%,表明了森林巨大的水土保持功能和理水作用。

林地去枯落物层后,径流量和泥沙量均有较多的增加,与原状林相比,分别增加了5.1倍和26.5倍。径流量为农地的73.0%,泥沙量相当于农地的2.0%。可见,林地枯落物层具有不可忽视的水源涵养作用。

林地采伐上层林木后,由于较好地保存了林下地被物,无论产流和产沙均无显著差异,与原状林相比,仅增加径流量1.6%,增加泥沙量1.7倍,说明只要合理经营利用森林资源,就可避免给山区造成新的水土流失。

#### 3.2 坡度和雨强对产沙量的影响

侵蚀产沙是多因子相互作用的综合结果,其中除下垫面植被因子外,还包括坡度、雨强、土壤等。为进一步阐明坡度和雨强的影响,在试验区土壤条件下,对油松林和农地不同坡度和雨强下的产沙量,进行了人工降雨试验,试验结果见表2。

由表2可见,随着坡度和雨强的增加,各处理产沙量均迅速增加,以雨强的效应更甚。在同一雨强下,坡度由10°增加到30°,产沙量增加不超过1倍,而在同一坡度下,雨强由1.0mm/min增加到2.0mm/min,侵蚀

产沙量则可增加1.5~5.3倍。为定量表达坡度( $\alpha$ )、雨强( $I$ )与侵蚀产沙( $S$ )的关系,分析水土流失各作用因子间的关系,根据上述正相关关系,选用拟合效果最好的幂函数方程  $S = a \cdot \alpha^b \cdot I^c$ , 得油松林地产沙模型如表3所示。

表2 油松林和农地在不同坡度和雨强下的产沙量比较

Table 2 Comparison of sediment yield between *P. tabulaeformis* stand and farmland under the conditions of different slopes and different rainfall densities

雨强 Rainfall densities		1.0mm/min			2.0mm/min		
		10°	20°	30°	10°	20°	30°
油松林 <i>P. tabulaeformis</i> stand	产沙量 Sediment yield( $t/km^2$ )	8.1	12.2	9.7	27.0	31.4	39.4
	实际雨强 Actual rainfall density(mm/min)	0.92~1.21			1.97~2.02		
农地 Farmland	产沙量 Sediment yield( $t/km^2$ )	1087.8	1429.8	2052.0	3885.4	4822.3	6300.8
	实际雨强 Actual rainfall density(mm/min)	0.93~0.99			2.05~2.26		

表3 油松林地和农地产沙模型

Table 3 Sediment production model for *P. tabulaeformis* woodland and farmland

地类 Type of land	$S = a \cdot \alpha^b \cdot I^c$	$n$	$r$	$F$
油松林地 <sup>1)</sup>	$S = 7.521 \cdot \alpha^{0.166} \cdot I^{0.593}$	18	0.930	9.541
农地 <sup>2)</sup>	$S = 370.389 \cdot \alpha^{0.495} \cdot I^{1.496}$	18	0.985	49.321

1) *P. tabulaeformis* woodland; 2) farmland

从表2还可以看出,在坡度为20°、雨强1.0mm/min 和2.0mm/min 的条件下,油松林地的产沙量分别为农地的0.85%和0.65%,这与在坡度为21°的径流小区内测定的结果基本一致。虽然1~2次暴雨造成的泥沙量,与全年或数年累计产沙量之间,在比例上有一定的差异,但这种结构不会因此而有明显变化。实际上,据各地多年观测,黄土高原每年造成的大量水土流失,主要是由几场暴雨引起的。

试验地区1990年07月21~22日的一场47.4mm暴雨,虽降雨量只相当于雨季降水量的11.6%,但造成的土壤流失量占当年同期全部流失量的84.6%。

### 3.3 产流产沙过程

产流产沙过程是水土流失数量化表示的动态结果,它客观地反映了径流和泥沙随时间的变化,是研究水土流失规律的重要组成部分。

**3.3.1 产流过程** 多年的观测结果表明,由于林冠截留(次最大截留量4.0mm),枯枝落叶层的吸收(次最大吸收量5.1mm)和土壤入渗作用,试验区油松林地开始产流降雨量一般在10mm以上,视雨强和前期降水条件而变化,雨强大、前期降水充分,产流降水量减少,但最少不低于6mm,否则无径流发生(见表4)。

根据坡面径流自动记录装置的测定结果,不同处理的产流过程常为一双峰或多峰曲线,这是由降水过程和地面多种因子综合作用的结果。以1992-07-10日的降雨为例,其降雨特征和各处理的产流过程分别见表5和图1。

从图1可以看出,下垫面性质不同,出现径流及其持续时间均有差异。农地开始产流时间最早,约在降雨后的15min,且持续时间最短,仅50min,径流相对集中。林地无枯落物覆盖,产流时间与农地无几差异,采伐地比农地滞后10min产流,油松林地产流时间最晚,在降雨后30min才开始,且持续时间长达110min,与农地相比,产流开始时间晚15min,持续时间长达60min,结束产流晚75min,林地延缓径流的作用显著。

由图1还可见,不同下垫面的径流起伏程度也不相同。农地和无枯落物覆盖的林地起伏量大,而油松林地和采伐地起伏程度小,表明林地、特别是地被物覆盖对径流调节的重要功能。各处理产流产沙特征值详见表6。

**表4 1991年雨季降雨及径流小区产流状况**  
**Table 4 State of rainfall and flow production**  
**in runoff plot of *P. tabulaeformis***  
**stand in raining season 1991**

日期 Date (Day/ Month)	降雨量 Rainfall (mm)	降雨历时 Rainfall duration (h)	平均雨强 Average rain- fall density (mm/min)	径流小区 产流状况 State of flow production in runoff plot
17/6	16.3	6.8	0.040	无 no
23/6	11.4	16.0	0.012	无 no
25/6	6.7	7.0	0.016	无 no
27/6	5.6	3.2	0.029	无 no
1/7	2.3	3.0	0.013	无 no
6/7	44.0	6.0	0.122	有 yes
9/7	5.8	0.6	0.161	无 no
10/7	2.5	0.3	0.138	无 no
21/7	47.4	9.5	0.083	有 yes
26/7	7.6	3.0	0.042	无 no
29/7	6.2	2.0	0.052	有 yes
31/7	29.9	6.0	0.083	有 yes
12/8	38.0	11.0	0.058	有 yes
14/8	34.3	18.8	0.030	有 yes
26/8	5.3	18.0	0.005	无 no
27/8	28.3	3.5	0.135	有 yes
31/8	1.8	1.0	0.030	无 no
3/9	11.2	4.0	0.047	有 yes
7/9	24.9	0.5	0.830	有 yes
8/9	14.9	6.0	0.041	有 yes
9/9	12.0	1.7	0.118	有 yes
13/9	4.2	1.3	0.054	无 no
20/9	5.0	1.0	0.083	无 no
22/9	43.1	2.0	0.359	有 yes

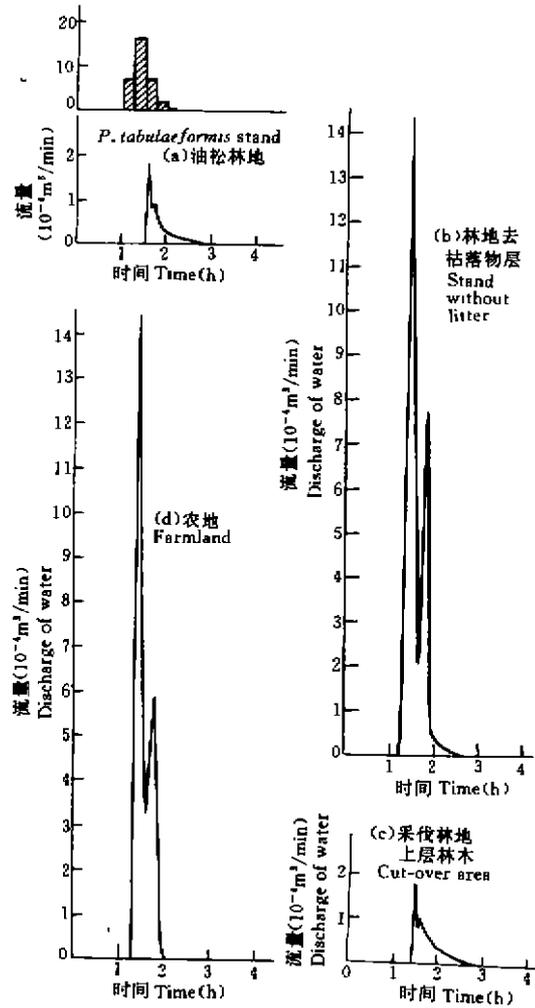


图1 油松林不同处理和农地的降雨径流过程  
 Fig. 1 Runoff process on *P. tabulaeformis* woodland and its different treatments as well as farmland

表5 次暴雨降水特征值

Table 5 Characteristic value of rainfall in once heavy rain

降雨历时 Rainfall duration (min)	降雨量 Rainfall (mm)	降雨强度 Rainfall density (mm/min)	10min 最大雨强 Maximum rate of rainfall in 10 min. (mm/min)	30min 最大雨强 Maximum rate of rainfall in 30 min. (mm/min)
68	31.2	0.46	1.22	0.84

由表6可见,除上述产流过程外,不同下垫面的产流量和产沙量差别很大,油松林地和采伐地产流很少,仅约0.1m<sup>3</sup>,农地和林地去枯落物层的产流量相当于前者的6~8倍;产沙量则农地比其它3种处理多223~1359倍,其效应与前述结果是完全一致的。

3.3.2 产沙过程 利用人工降雨试验,通过对产流的定时取样和泥沙含量的测定,对油松林地的产沙过

程进行了研究,并与农地的产沙过程进行比较、分析,取样和测定结果见表7。

泥沙通常随径流而下。由表7可见,在设计雨强1.0mm/min、实际雨强0.94~1.10mm/min的条件下,林地一般在降雨开始后3~5min产流并产沙,较前述天然降雨条件下需最少6mm降水有所减少,这是因为人工降雨强度较大,且土壤水分含量较高之故。

测定结果表明,在30min的降雨过程中,无论下垫面性质、坡度如何,即使在均匀降雨条件下,产沙过程并不平稳,通常其初期产沙较多,以后随时间递减。对裸露的农地,到一定时间(产沙26~28min后)还有少量增加。油松林地及其对比农地的累积产沙随时间的变化过程见图2。

据对产沙资料的分析可知,累积产沙量随时间的变化符合幂函数方程:

$$R = a + bt^c$$

式中:R为累积产沙量;t为产沙时间;a、b、c为参数。

把通过计算机模拟求得的参数值代入上列方程,得油松林地和农地不同坡度的累积产沙方程(见表8)。

据此可以认为,在天然降雨条件下,由于降水不均,产沙过程也是一个有起伏的过程,且下垫面性质不同,其起伏程度亦不相同。但就产沙量而言,坡度、雨强和下垫面性质均有重要影响。如表7所列,在坡度和雨强相似情况下,油松林地的产沙量比裸露农地大大降低,所减少的绝对值随坡度增加而增加,即由坡度10°的1.16kg/m<sup>2</sup>增加到坡度20°的1.67kg/m<sup>2</sup>,而相对值却由坡度10°的170倍减少到坡度20°的23倍。在雨强和下垫面相似的情况下,产沙量随坡度增加而增加,林地由坡度10°的0.01kg/m<sup>2</sup>增加到坡度20°的0.07kg/m<sup>2</sup>,农地由1.16kg/m<sup>2</sup>增加到1.74kg/m<sup>2</sup>。

表6 油松林不同处理产流产沙特征值

Table 6 Characteristic value of flow and sediment for different treatments of *P. tabulaeformis* stand

处理 Treatment	产流历时 Flow duration (min)	产流量 Runoff volume (m <sup>3</sup> )	径流系数 Runoff coefficient	产沙量 Sediment yield (kg/m <sup>2</sup> )	冲刷量 Soil loss (kg/100m <sup>2</sup> )	侵蚀模数 Erosive modulus (t/km <sup>2</sup> )
油松林 <sup>①</sup>	110	0.1036	0.033	0.330	0.034	0.34
林地去枯落物层 <sup>②</sup>	60	0.8895	0.285	2.000	1.779	17.79
采伐上层林木 <sup>③</sup>	90	0.0940	0.030	1.330	0.125	1.25
农地 <sup>④</sup>	50	0.7691	0.247	448.840	345.203	3452.03

① *P. tabulaeformis* stand; ② Stand without litter; ③ Cutover area; ④ Farmland.

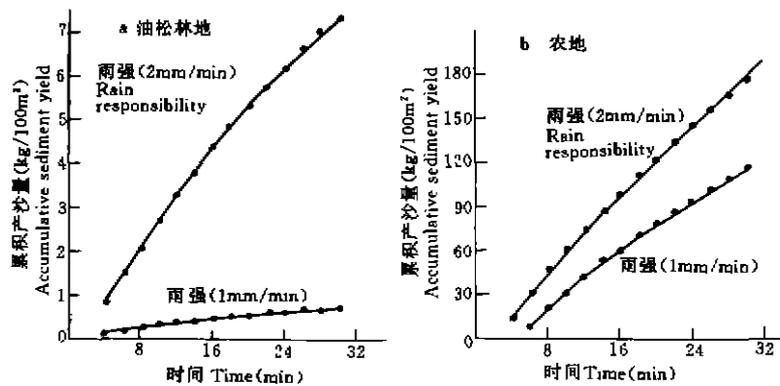


图2 油松林地和农地累积产沙过程

Fig. 2 Process of accumulative sediment yield on *P. tabulaeformis* woodland and farmland

表7 油松林地和农地产沙量动态过程

Table 7 Dynamic process of sediment yield for *P. tabulaeformis* woodland and farmland

地类①	坡度②	雨强③ (mm/min)	产沙时间 Sediment production time(min)													合计 Total		
			2	4	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26		28	30
油松林地④	10°	1.10	—	0.068	0.066	0.088	0.070	0.050	0.044	0.044	0.040	0.040	0.038	0.034	0.031	0.026	0.023	0.680
	20°	0.94	—	0.790	0.639	0.584	0.639	0.620	0.526	0.493	0.474	0.435	0.451	0.451	0.463	0.376	0.316	7.230
农地⑤	10°	0.97	—	—	9.855	10.127	10.980	10.437	9.622	3.924	8.614	8.458	8.109	7.915	7.760	7.488	8.032	116.321
	20°	0.99	—	—	12.236	17.822	15.325	14.414	13.702	13.268	11.840	11.405	11.167	10.732	10.375	10.019	10.652	116.009

①Type of land; ②Slope; ③Rainfall density; ④*P. tabulaeformis* woodland; ⑤Farmland

表8 油松林地和农地不同坡度的累积产沙方程

Table 8 Equation of accumulative sediment yield on different slopes of *P. tabulaeformis* woodland and farmland

地点	坡度	雨强(mm/min)	$R=a+bt^r$	n	r	F
Type of land	Slope	Rainfall density				
油松林地	10°	1.10	$r = -0.260 + 0.176t^{0.506}$	14	0.997	3423.579
<i>P. tabulaeformis</i>						
woodland	20°	0.94	$R = -0.441 + 0.372t^{0.905}$	14	0.997	2036.468
农地	10°	0.97	$R = -60.363 + 24.200t^{0.581}$	13	0.999	12096.739
Farmland	20°	0.99	$R = -21.339 + 11.094t^{0.852}$	14	0.998	3599.074

4 结论

- 4.1 油松林地的蓄水减沙效益显著,6a 平均地表径流量和土壤流失量分别比农地减少88.0%和99.9%,其径流系数仅为0.0064,表明森林巨大的保持水土作用。
- 4.2 林地枯枝落叶层具有良好的水源涵养功能,除去枯落物层使径流量增加5.1倍,为农地径流量的73.0%,故在生产中应予积极保护。
- 4.3 林地采伐上层林木后,只要较好地保存林下地被物,对产流产沙不会产生明显影响。所以,如能合理经营利用油松林资源,并在伐后尽快恢复植被,不会给山区造成新的水土流失。
- 4.4 坡度和雨强对产沙有重要作用,其中又以雨强效应更甚。黄土高原每年大量的水土流失,主要是由几场暴雨造成。
- 4.5 在天然降水条件下,油松林地的起流降雨量通常在10mm 以上,视雨强和前期降水条件而有变化,但最少不低于6mm。
- 4.6 由于降水过程不匀和地面多种因子的作用,产流过程线多为双峰或多峰曲线,其起始时间和持续时间随下垫面性质不同而不同,林地延缓径流的作用显著。
- 4.7 在人工均匀降雨的条件下,林地产沙过程并不平稳,通常初期产沙量大,以后随时间递减,其累积产沙量(R)随时间(t)的变化,符合幂函数方程。

参 考 文 献

- 1 蔡庆等. 林地开垦人为加速侵蚀的人工降雨试验研究. 中国科学院, 水利部水土保持研究所集刊, 1993, (14), 79~86
- 2 刘向东等. 六盘山森林保持水土生态功能评价. 水土保持学报, 1987, (1), 90~97
- 3 吴钦孝等. 森林集水区水文效应的研究. 人民黄河, 1994, (12), 25~27
- 4 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993. 244~266