

# 晋西黄土区不同植被覆盖流域的水文响应

郑 芳<sup>1</sup>, 张建军<sup>1,2,\*</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2. 山西吉县落叶阔叶林生态系统国家野外站,山西吉县 042200)

**摘要:**为了研究不同植被覆盖对流域径流的影响,以晋西黄土区蔡家川流域内的天然次生林流域和人工林流域为对象进行了对比分析。结果表明,天然次生林流域的年径流量、雨季径流量均小于人工林流域,天然次生林流域的年总径流量、雨季径流量分别是人工林流域的 58.57%、48.04%,年地表径流量、雨季地表径流量分别比人工林流域减少了 82.95%、81.12%;人工林流域的基流量为零;在短历时高雨强的降雨形式下天然次生林流域的削洪效应显著,其单位面积洪峰流量比人工林流域减少了 83.41%;不同植被覆盖下径流对不同雨型的响应不同,人工林流域在 A 型雨条件下的单位面积洪峰流量是 B、C 型雨的 10.08 倍、3.35 倍,天然次生林流域在 A 型雨条件下的单位面积洪峰流量是 B、C 型雨的 6.79 倍、1.64 倍。

**关键词:**径流;植被覆盖;流域;黄土区

## Hydrological response to changes in vegetation covers at a watershed scale in western Shanxi, Loess Plateau, China

ZHENG Fang<sup>1</sup>, ZHANG Jianjun<sup>1,2,\*</sup>

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Chinese National Ecosystem Observation and Research Station, Ji County 042200, China

**Abstract:** Soil erosion is one of the most environmental problems in arid areas of the Loess Plateau in North China. And understanding the relationships between vegetation covers, especially man-made forests, and runoff and soil erosion is key to ecological restoration in the region. Previous studies showed that forests can reduce runoff amount and protect soil from eroding in loess gully area of the Loess Plateau in North China. But the man-made forests such as *Robinia pseudoacacia* plantations would consume more water and may lead to severe loss of soil water, which is harmful to the hydrologic functions of forests in the Loess Plateau.

We examined the hydrologic differences of two watersheds with different landuse and landcover types, one natural forest and one artificial forest in the Caijiachuan watershed in the loess hilly region of western Shanxi Province. These two neighboring experimental watersheds (one of which was planted artificial trees such as *Robinia*, *Pinus* and *Platycladus*, and the other has been closed for 26 years) have the similar characters of soil, geology and physiognomy. Based on water observation data and precipitation data collected from 2004 to 2009 in experimental watersheds of loess areas, comparisons of the annual runoff and the rainy-season runoff between natural forest and artificial forest, and analyses of the correlation and regression under different types of rainfall were used to discuss on the relationships between runoff and vegetation covers.

The results in this study showed that the annual runoff and the rainy-season runoff (June-September) from the natural forest watershed was significantly lower than that from the artificial forest watershed, 58.6% and 48.0%, respectively. Annual and rainy season overland flow from the natural forest watershed was lower by 83%, 81.1% respectively when compared to that from the artificial forest watershed. Baseflow was negligible in the artificial forest watershed. Under A-type rainfall(storm events with short duration and high intensity), peak discharge per unit area in the natural forest watershed

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A1204);日本住友财团研究助成(083085)

收稿日期:2010-05-09; 修订日期:2010-07-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

was significantly lower by 83.4%, compared with that in the artificial forest watershed. The types of rainfall had impact on runoff in small watersheds with different vegetation covers. For the artificial forest watershed, the average peak discharge per unit area under A-type rainfall was highest, about 10.1 times of that under B-type rainfall (storm events with long duration and high intensity), about 3.4 times of that under C-type rainfall (storm events with long duration and low intensity). For natural forest watershed, the average peak discharge per unit area under A-type rainfall was also highest, about 6.8 times of that under B-type rainfall, about 1.6 times of that under C-type rainfall. So we concluded that flood events and thus soil erosion would likely to occur under A-type rainfall events. And some measures for water and soil conservation should be taken especially under A-type rainfall events.

This study suggested that natural forests could reduce more runoff and peak discharge than the artificial forests. Natural vegetation recovery had better hydrologic benefits in water and soil conservation and thus should be promoted in the loess gully area of the Loess Plateau. Also, man-made forests should be managed to realize their intended hydrologic functions.

**Key Words:** runoff; vegetation covers; watershed; the Loess Plateau

干旱半干旱的黄土高原地区,土壤疏散,抗侵蚀能力弱,在以高强度降水为主要降雨形式下,水土流失十分严重。森林植被可以通过截持雨水、固土防蚀等减少地表径流,削减泥沙量<sup>[1]</sup>。几十年来许多研究者已对森林植被与降雨径流、泥沙的关系作了大量研究<sup>[2-7]</sup>。Sun 等<sup>[8]</sup>建立了区域产流模型并应用于美国东南部地区,结果表明植被的减少会引起年径流量的增加。Muela 等<sup>[9]</sup>对地中海森林植被的水文效应进行研究后指出,森林植被可以削减径流、减少土壤流失。王礼先<sup>[1]</sup>等认为干旱地区森林植被能够涵养水源,减少洪水流量,增加枯水期流量。吴钦孝<sup>[10]</sup>等对油松林地的产流产沙过程进行多年观测后指出,枯枝落叶层具有良好的水源涵养功能。黄明斌<sup>[11]</sup>等对枯季径流与汛期降水、枯水季节降水进行了分析,认为森林植被对枯水期河川径流的调节作用十分有限。张晓明<sup>[12]</sup>等基于动力水文过程测定技术和景观生态学测度方法,对土地利用/覆盖变化与流域径流输沙的关系进行了研究,结果表明随植被覆盖的增加,年输沙量有所下降。

水土保持林对于水土流失的治理、生态环境的改善具有积极作用。在水资源极其匮乏的黄土区,营造水土保持林是防治水土流失的重要措施。但水土保持林的防护作用如何?水土保持对流域径流的影响及其方向都是水土流失治理中亟待回答的实际问题<sup>[13-14]</sup>。对水土保持林的水文效应研究,不同地区的研究结果不同<sup>[13-17]</sup>。Tang<sup>[18]</sup>等对云南中部人工林与天然林的植被多样性和水土保持作用进行分析后得出,人工林的营养淋溶流失大于天然林;穆兴民<sup>[13]</sup>等分析了黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响,结果表明水土保持使小流域产洪次数减少,地表径流模数和径流系数减少;张理宏<sup>[19]</sup>等通过对北京九龙山植被的水文因子进行分析后,认为次生灌木林同样具有良好的水源涵养作用,其水土保持功能不比同区的人工林差。但在晋西黄土区以小流域为尺度,定量比较分析不同植被覆盖的水土保持作用的研究尚不多见,在黄土高原地区对人工林和天然次生林水文效益的对比研究甚少。本文对晋西黄土区人工林和天然次生林与年、雨季、枯季径流的关系,以及不同雨型下人工林流域和天然次生林流域的次降雨-径流关系进行比较分析,以期为该区水土保持植被恢复与配置提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于吕梁山南端山西省吉县蔡家川流域,是北京林业大学所属的山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站所在地。地理坐标为东经 110°39'45"—110°47'45",北纬 36°14'27"—36°18'23"。属于黄土残塬沟壑区,流域大体上为由西向东走向,长约 14km,面积 38km<sup>2</sup>,海拔 900—1513m。该流域属暖温带褐土阔叶落叶林地带向森林草原地带的过渡地带,年平均降水量为 575.9mm,最大年降水变率为 43.1%,6—9 月份降水占年降水量的 70% 左右。土壤为褐土,黄土母质。森林覆盖率 39.8%,流域中上游植被主要为白桦

(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、丁香(*Syzygium aromaticum*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)等组成的天然次生林,中游为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等树种组成的人工林,下游为荒草坡和农地。

## 1.2 研究方法

在蔡家川流域内选择以水土保持林为主的人工林流域(图1中的3号小流域)和采取封山育林恢复植被26a的天然次生林流域(图1中的4号小流域)作为对比研究流域,这两个流域相互毗邻,且地形、地质、地貌、土壤基本相似。各流域的基本情况和分布图见表1、图1。

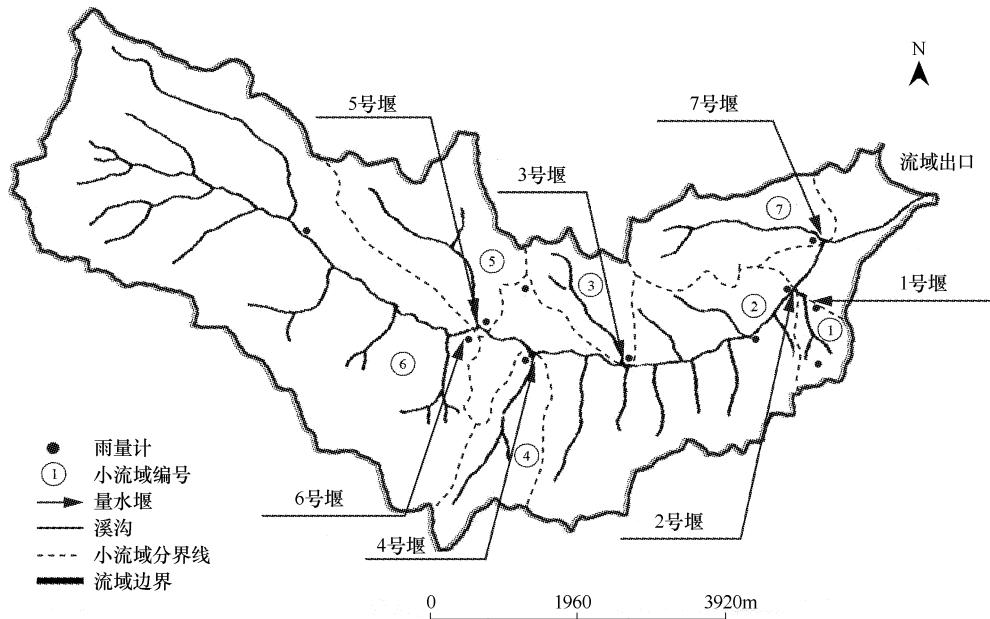


图1 研究区地理概况

Fig. 1 Geographical features of the study area

表1 各试验流域基本情况统计

Table 1 The basic information of experimental watersheds

编号 No.	流域名称 Name	流域面积 Area/km <sup>2</sup>	森林覆盖率 Forest cover rate/%	形状系数 Shape coefficient	河网密度 Gully intensity /(km·km <sup>-2</sup> )	河流比降 Gradient	植被类型 Vegetation cover
3	人工林流域	1.50	92.48	3.03	3	0.12	以15年生人工刺槐林、油松林、侧柏林为主
4	天然次生林流域	1.93	99.95	4.40	4.1	0.08	封禁26a,以山杨、辽东栎、丁香、虎榛子等组成的次生林为主

在研究流域内布设长期自记雨量计测定降雨过程,利用流域出口处修建的复合型测流堰,通过超声波水位计(ISCO4100)测定水位(每5min测定水位1次),同时利用浮子式长期自记水位计(日产水研62型)记录的水位进行校正。径流量利用水位流量关系曲线计算,基流量采用直线切割法求算。各复合型测流堰的水位-流量公式均为:

$$Q = 0.0172H^{2.5034} \quad H \leq 50\text{cm}$$

$$Q = 308 + 10.798(H - 50)^{1.5181} \quad H > 50\text{cm}$$

式中,Q为流量(L·s<sup>-1</sup>);H为水位(cm)。

本文采用2004—2009年连续6a的降雨径流资料,对人工林流域和天然次生林流域的年、雨季、枯季的径流特征值进行比较分析,并采用SPSS17.0中的相关分析、回归分析等统计方法,定量分析不同雨型下人工林

流域和天然次生林流域的降雨-径流关系。

### 1.3 场降雨分类

根据王万忠<sup>[20]</sup>等人在黄土区的研究,黄土区的降雨可根据降雨量、降雨历时、平均降雨强度、10min最大雨量、30min最大雨量、60min最大雨量等指标,划分为短时局地雷暴雨(A型)、锋面性降雨夹有雷暴性质的暴雨(B型)、长历时锋面降雨(C型)。

本研究利用以上指标对蔡家川流域观测到的2004—2009年的57场全流域降雨进行聚类分析,聚类结果的统计见图2。聚类分析结果差异显著( $P < 0.05$ ),表明聚类效果较好。在这57场降雨中,A类雨33次,累积降雨量422.4mm,分别占总降雨场次、总降雨量的57.9%、38.3%;B类雨18次,累积降雨量399.8mm,分别占总降雨场次、总降雨量的31.6%、36.2%;C类雨6次,累积降雨量280.9mm,分别占总降雨场次、总降雨量的10.5%、25.5%。其聚类结果与王万忠<sup>[20]</sup>、张建军<sup>[21]</sup>等人的研究结果基本一致。

## 2 结果与分析

森林对流域径流量的影响主要包括对年径流量、洪水流量和枯水期流量的影响<sup>[1]</sup>。

### 2.1 不同植被覆盖对年径流量的影响

表2是2004—2009年人工林流域和天然次生林流域年径流量统计表。从表2可见,天然次生林流域的年径流量和年径流系数均小于人工林流域。天然次生林流域的平均年径流量、径流系数分别是人工林流域的58.57%、58.56%,天然次生林流域的平均年地表径流量比人工林流域少了82.95%。虽然天然次生林流域的年径流量、年径流系数、地表径流量和地表径流系数均小于人工林流域,但基流量远大于人工林流域。人工林流域只有在降雨时才有径流,无降雨时均处于干涸状态。可见,人工植被和自然恢复的植被相比,在涵养水源方面的功能并不完全相同,自然恢复的植被在有效减少地表径流的同时,能将雨水转化为基流,使年径流过程趋于平稳化,而人工植被却将拦蓄的雨水均转化为蒸发散消耗掉了,使得能渗入地下转为基流的雨水少之又少,流域出口基流量为零。

表2 2004—2009年各试验流域年径流量

Table 2 Yearly runoff of experimental watersheds from 2004 to 2009

流域名称 Name	年份 Year	降雨量 Rainfall amount/mm	径流量 Runoff depth/mm	径流系数 Runoff coefficient/%	地表径流量 Overland runoff depth/mm	地表径流系数 Overland runoff coefficient/%	基流量 Base runoff depth/mm	基流系数 Base runoff coefficient/%
人工林流域 Artificial forests	2004	315.5	17.61	5.58	17.61	5.58	0	0
	2005	258.0	6.58	2.55	6.58	2.55	0	0
	2006	575.5	13.16	2.29	13.16	2.29	0	0
	2007	454.5	9.89	2.18	9.89	2.18	0	0
	2008	293.7	7.62	2.60	7.62	2.60	0	0
	2009	422.5	9.87	2.34	9.87	2.34	0	0
	平均值	386.6	10.79	2.92	10.79	2.92	0	0
天然次生 林流域 Natural forests	2004	315.5	5.48	1.74	1.76	0.56	3.72	1.18
	2005	298.5	4.13	1.38	1.23	0.41	2.90	0.97
	2006	512.5	9.98	1.95	3.15	0.61	6.83	1.33
	2007	360.6	6.51	1.81	1.38	0.38	5.13	1.42
	2008	286.7	4.91	1.71	0.92	0.32	3.99	1.39
	2009	412.5	6.89	1.67	2.58	0.63	4.31	1.04
	平均值	364.4	6.32	1.71	1.84	0.49	4.48	1.22

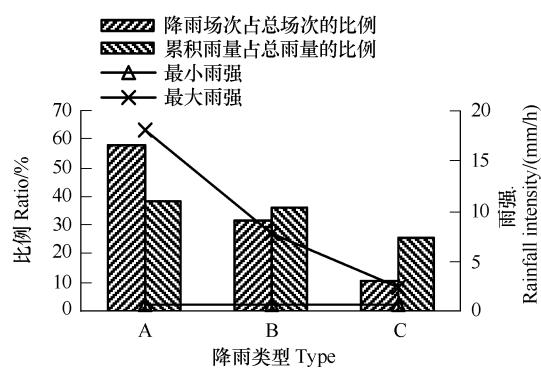


图2 场降雨分类结果统计

Fig. 2 statistics of rainfall classification

## 2.2 不同植被覆盖对雨季径流和枯季径流的影响

研究区雨季为6—9月份,是降雨最为集中的时期,该期间的累积降雨量占全年流域总降雨量的70%左右<sup>[22]</sup>。除6—9月份外,其他月份的降水较少,为枯季时期。表3是2004—2009年的人工林流域和天然次生林流域6—9月径流量统计情况。从表3可以看出,天然次生林流域的雨季径流量、径流系数仍然小于人工林流域。天然次生林流域雨季的平均径流量、径流系数分别是人工林流域的48.04%、49.26%;天然次生林流域雨季的地表径流量也远小于人工林流域,其平均地表径流量比人工林流域少了81.12%。即使在雨季人工林流域也没有基流量。

表3 2004—2009年各试验流域雨季径流量

Table 3 The rainy-season runoff of experimental watersheds from 2004 to 2009

流域名称 Name	年份 Year	降雨量 Rainfall amount/mm	径流量 Runoff depth/mm	径流系数 Runoff coefficient/%	地表径流量 Overland runoff depth/mm	地表径流系数 Overland runoff coefficient/%	基流量 Base runoff depth/mm	基流系数 Base runoff coefficient/%
人工林流域 Artificial forests	2004	306.5	15.96	5.21	15.96	5.21	0	0
	2005	225.0	5.56	2.47	5.56	2.47	0	0
	2006	506.5	12.95	2.56	12.95	2.56	0	0
	2007	372.0	6.72	1.81	6.72	1.81	0	0
	2008	279.3	5.65	2.02	5.65	2.02	0	0
	2009	300.0	6.84	2.28	6.84	2.28	0	0
	平均值	331.6	8.95	2.72	8.95	2.72	0	0
天然次生 林流域 Natural forests	2004	312.0	3.52	1.13	1.73	0.55	1.79	0.57
	2005	259.5	2.74	1.06	1.12	0.43	1.62	0.62
	2006	449.5	7.87	1.75	3.03	0.67	4.84	1.08
	2007	293.1	3.87	1.32	1.22	0.42	2.66	0.91
	2008	262.2	3.31	1.26	0.90	0.34	2.40	0.92
	2009	297.5	4.52	1.52	2.12	0.71	2.39	0.80
	平均值	312.3	4.30	1.34	1.69	0.52	2.62	0.82

枯季总径流占年总径流量的比例,可以清楚地反映不同植被覆盖对流域枯水期径流的影响<sup>[23]</sup>。表4是2004—2009年天然次生林流域和人工林流域枯季径流占年径流的比例。从表4可见,天然次生林流域枯水季节径流量的比例大于人工林流域。天然次生林流域枯水季节径流量的比例为21.11%—40.51%,而人工林流域的比例为1.57%—32.03%,天然次生林流域枯水季节径流所占比例是人工林流域的1.72倍。可以认为自然恢复的植被在维持枯水季节河川径流量方面的作用显著高于人工植被。

表4 2004—2009年各试验流域枯季总径流量占年总径流量的比例/%

Table 4 The proportion of dried-up season runoff to annual runoff of experimental watersheds from 2004 to 2009

流域名称 Name	2004	2005	2006	2007	2008	2009	平均值 Mean
人工林流域 Artificial forests	9.38	15.55	1.57	32.03	25.84	30.67	19.17
天然次生林流域 Natural forests	35.77	33.66	21.11	40.51	32.66	34.40	33.02

## 2.3 雨型对不同植被覆盖流域降雨-径流关系的影响

### 2.3.1 A型降雨条件下不同植被覆盖流域的降雨-径流关系

与其他雨型相比A型降雨平均降雨量最小,平均降雨历时最短,平均降雨强度最大。对不同降雨类型下人工林流域和天然次生林流域的次降雨径流进行统计分析得到表5。从表5可以看出,在A型降雨条件下,人工林流域的径流量、径流系数、单位面积洪峰流量均大于天然次生林流域,分别是天然次生林流域的6.77—7倍、3.01—8.03倍、0.67—8.81倍。可以认为,自然恢复的植被对短历时高雨强的降雨的拦蓄作用远大于人工植被。

表5 不同降雨类型下各试验流域次降雨径流统计

Table 5 Statistics of hypo-rainfall runoff of experimental watersheds under different types of rainfall

雨型 Type	雨型特征 Characteristic of types of rainfall	流域名称 Name	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation
A型雨 A-type rainfall	降雨量 4—39.5mm, 雨量均值为 12.8mm; 平均降雨历时为 176min; 降雨强度 0.6—18mm·h <sup>-1</sup> , 均值为 6.42mm·h <sup>-1</sup> ; 10min、30min、60min 最大雨强的均值分别为 21.5mm·h <sup>-1</sup> 、14.4mm·h <sup>-1</sup> 、9.6mm·h <sup>-1</sup>	人工林流域	径流量/mm	0.0028	4.1098	0.5185
			单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.0002	2.6711	0.2580
			径流系数/%	0.0522	17.2682	3.3722
		天然次生林流域	径流量/mm	0.0004	0.6073	0.1237
			单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.0003	0.3033	0.0428
			径流系数/%	0.0065	5.7290	0.8368
B型雨 B-type rainfall	降雨量 8—38.3mm, 雨量均值为 22.21mm; 平均降雨历时为 710.72min; 降雨强度 0.6—7.8mm·h <sup>-1</sup> , 均值为 2.22mm·h <sup>-1</sup> ; 10min、30min、60min 最大雨强的均值分别为 14.6mm·h <sup>-1</sup> 、9.9mm·h <sup>-1</sup> 、6.7mm·h <sup>-1</sup>	人工林流域	径流量/mm	0.0769	1.6145	0.4438
			单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.0016	0.0958	0.0256
			径流系数/%	0.2062	5.9891	1.9364
		天然次生林流域	径流量/mm	0.0132	0.9906	0.1784
			单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.0007	0.0195	0.0063
			径流系数/%	0.1096	2.7518	0.6510
C型雨 C-type rainfall	降雨量 21.6—76mm, 雨量均值为 46.82mm; 平均降雨历时为 1884.17min; 降雨强度 0.6—2.4mm·h <sup>-1</sup> , 均值为 1.5mm·h <sup>-1</sup> ; 10min、30min、60min 最大雨强的均值分别为 13.3mm·h <sup>-1</sup> 、9.4mm·h <sup>-1</sup> 、6.9mm·h <sup>-1</sup>	人工林流域	径流量/mm	0.8638	2.5240	1.5226
			单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.0411	0.1592	0.0770
			径流系数/%	1.9552	4.088	2.9474
		天然次生林流域	径流量/mm	0.0664	0.4745	0.3266
			单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.0027	0.1099	0.0261
			径流系数/%	0.3073	1.1110	0.7197

对不同降雨类型下径流与降雨要素间的关系进行相关分析得到表6。从表6可见,A型降雨条件下天然次生林流域和人工林流域的径流量、单位面积洪峰流量与降雨量、10min最大雨强、30min最大雨强、60min最大雨强之间均有较好的相关性。人工林流域和天然次生林流域的径流量均与降雨量的相关性最好,而单位面积洪峰流量与60min最大雨强的相关性最好。

表6 不同降雨类型下各试验流域次降雨-径流的相关系数

Table 6 Correlation coefficient of event rainfall and runoff of experimental watersheds under different types of rainfall

雨型 Type	流域名称 Name	降雨量 Rainfall amount/mm	10min 最大雨强 30min 最大雨强 60min 最大雨强		
			The biggest rainfall intensity in 10mins /(mm·h <sup>-1</sup> )	The biggest rainfall intensity in 30mins /(mm·h <sup>-1</sup> )	The biggest rainfall intensity in 60mins /(mm·h <sup>-1</sup> )
A型雨 A-type rainfall	人工林流域	径流量/mm	0.862 **	0.786 **	0.852 **
		单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.544 **	0.499 *	0.554 **
B型雨 B-type rainfall	天然次生林流域	径流量/mm	0.592 **	0.550 **	0.523 **
		单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.653 **	0.616 **	0.601 **
C型雨 C-type rainfall	人工林流域	径流量/mm	0.811 *	0.912 **	0.939 **
		单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.543	0.694 *	0.688 *
C型雨 C-type rainfall	天然次生林流域	径流量/mm	0.701 *	0.455	0.481
		单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.835 **	0.632 *	0.752 **
C型雨 C-type rainfall	人工林流域	径流量/mm	0.755	0.429	0.363
		单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.103	0.782	0.513
C型雨 C-type rainfall	天然次生林流域	径流量/mm	0.559	0.375	0.305
		单位面积洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	0.110	0.899 *	0.691

\* P &lt; 0.05; \*\* P &lt; 0.01

张晓明<sup>[24]</sup>等将黄土区次降雨径流量与次降雨总量、60min 雨强进行多元回归分析,结果表明次降雨径流量与降雨量和雨强均呈良好的相关关系。徐宪立<sup>[25]</sup>等将降雨量、平均降雨强度以及两者的组合(乘积)与径流量进行回归分析,结果表明降雨量和平均降雨强度的乘积与径流量的相关关系最好。本文分别对次降雨径流量、单位面积洪峰流量与降雨量和 60min 最大雨强的组合(乘积)进行线性拟合如表 7。从表 7 可以看出,人工林流域径流量、洪峰流量拟合公式的斜率明显大于天然次生林流域,分别是天然次生林流域的 3.34 倍和 34.79 倍。表明天然次生林流域的径流量、洪峰流量随  $PI_{60}$  的变化显著低于人工林流域,这说明在 A 型降雨条件下天然次生林流域比人工林流域能更好地消减洪峰和径流量。

表 7 A 型降雨条件下各试验流域次降雨径流、洪峰的回归方程

Table 7 Regression equations of hypo-rainfall runoff, peak discharge of experimental watersheds under A-type rainfall

流域名称 Name	径流量回归方程 Regression equations of runoff	洪峰流量回归方程 Regression equations of peak discharge
人工林流域	$Y_r = 0.006 + 0.001148 PI_{60}, R = 0.87^{**}$	$Y_p = 0.006 + 0.001183 PI_{60}, R = 0.569^{**}$
天然次生林流域	$Y_r = 0.054 + 0.000344 PI_{60}, R = 0.549^{**}$	$Y_p = 0.005 + 0.000034 PI_{60}, R = 0.688^{**}$

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ;  $Y_r$ : 径流量 Runoff/mm;  $Y_p$ : 单位面积洪峰流量 Peak discharge per unit area/(m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>);  $P$ : 次降雨量 Event rainfall/mm;  $I_{60}$ : 60min 最大雨强 The biggest rainfall intensity in 60mins/(mm·h<sup>-1</sup>);  $R$ : 相关系数 Correlation coefficient

### 2.3.2 B 型降雨条件下不同植被覆盖流域的降雨-径流关系

B 型降雨的平均降雨量、平均降雨历时比 A 型雨大,比 C 型雨小,平均降雨强度也介于 A 型雨和 C 型雨之间。从表 5 可以看出,在 B 型降雨条件下,人工林流域的径流量、径流系数、单位面积洪峰流量均大于天然次生林流域,分别是天然次生林流域的 1.63—5.83 倍、1.88—2.18 倍、2.29—4.91 倍。

从表 6 可以看到,B 型降雨条件下人工林流域的径流量与各降雨因子有良好的相关关系,洪峰流量与 10min 最大雨强、30min 最大雨强、60min 最大雨强之间均有良好的相关关系,但与降雨量的关系不显著;天然次生林流域径流量只与降雨量有显著的相关关系,而洪峰流量与各降雨因子均有显著相关性。人工林流域径流量与 60min 最大雨强的相关性最大,而天然次生林流域径流量与降雨量的相关性最大。人工林流域和天然次生林流域的洪峰流量与 60min 最大雨强的相关关系最好。

对径流量、洪峰流量与雨量和 60min 最大雨强的组合(乘积)进行回归分析,如表 8 所示。在 B 型降雨条件下,人工林流域径流量、洪峰流量拟合公式的斜率较大,分别是天然次生林流域的 6.07 倍和 4.24 倍。说明在 B 型降雨条件下随着  $PI_{60}$  的变化,人工林流域的径流量、洪峰流量的变化仍大于天然次生林流域。

表 8 B 型降雨条件下各试验流域次降雨径流、洪峰的回归方程

Table 8 Regression equations of hypo-rainfall runoff, peak discharge of experimental watersheds under B-type rainfall

流域名称 Name	径流量回归方程 Regression equations of runoff	洪峰流量回归方程 Regression equations of peak discharge
人工林流域	$Y_r = 0.104 + 0.000662 PI_{60}, R = 0.973^{**}$	$Y_p = 0.006 + 0.000072 PI_{60}, R = 0.699^*$
天然次生林流域	$Y_r = 0.051 + 0.000109 PI_{60}, R = 0.513$	$Y_p = 0.002 + 0.000017 PI_{60}, R = 0.841^{**}$

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ;  $Y_r$ : 径流量 Runoff/mm;  $Y_p$ : 单位面积洪峰流量 Peak discharge per unit area/(m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>);  $P$ : 次降雨量 Event rainfall/mm;  $I_{60}$ : 60min 最大雨强 The biggest rainfall intensity in 60mins/(mm·h<sup>-1</sup>);  $R$ : 相关系数 Correlation coefficient

### 2.3.3 C 型降雨条件下不同植被覆盖流域的降雨-径流关系

与 A、B 型雨相比,C 型雨的降雨量最大,降雨历时最长,平均雨强最小。从表 5 可以看到,在 C 型降雨条件下,平均径流量、径流系数、单位面积洪峰流量的大小顺序均为:人工林流域 > 天然次生林流域。人工林流域的径流量、径流系数、单位面积洪峰流量分别是天然次生林流域的 5.32—13.01 倍、3.68—6.36 倍、1.45—15.22 倍。

从表 6 可以看出,在 C 型降雨条件下,天然次生林流域洪峰仅与 10min 最大雨强的相关性显著,人工林流域径流、洪峰与雨量、雨强的相关性均不好(这很可能是由于 C 型降雨数据较少所致)。比较径流与各降雨因子的相关系数,人工林流域和天然次生林流域的径流量均与降雨量的相关系数最大,而洪峰流量均与 10min

最大雨强的相关系数最大。

### 3 讨论

(1) 森林对流域径流的影响主要包括对年总径流量的影响和对流域径流量时程分配的影响,后者包括对洪水流量和枯水期流量的影响<sup>[1]</sup>。森林可以通过3个方面来减小径流量,即林冠截留、枯枝落叶层的拦蓄和土壤蓄水。相关研究表明,森林可以消耗降雨量的70%—80%,其中林冠截留蒸发为8%,森林植被生理消耗为23%,森林地被物和土壤蓄水为45%<sup>[11]</sup>。本研究表明,人工林流域的年径流系数2.92%,天然次生林流域的年径流系数1.71%,与同类地区<sup>[11,26-27]</sup>相比,本研究地区的径流系数明显偏低。这主要是由于本研究的人工林流域和天然次生林流域森林覆盖率很高,均达到90%以上。降雨时大面积的植被通过林冠截留和枯枝落叶拦蓄使到达地表的有效雨量减少,再加上森林土壤良好的渗透性能,只有极少的雨水有可能形成径流。因此,本研究区域的产流量很低。可以认为黄土高原地区不论是人工恢复的植被,还是自然恢复的植被,均具有显著减少降雨径流的作用。

森林对枯水期径流的影响表现在增加枯水期流量<sup>[1]</sup>。枯季总径流占年总径流量的比重,可以清楚地反映不同植被覆盖对流域枯水期径流的影响。本研究结果表明,天然次生林流域枯水季节总径流占年总径流量的比重显然大于人工林流域,可以认为自然恢复的植被对枯水季节径流量的调节作用大于人工植被。天然次生林流域为封山育林形成的全林流域,以天然次生乔木林、灌木林为主,该流域的植被条件好,林下草本植被茂盛,地表枯枝层厚,地表糙率大,土壤渗透能力强,雨季时期拦截雨水多,并将大部分雨水转为地下水,在枯季时期以基流形式流出,导致该流域枯季径流占年径流的比例大。

森林对流域径流的影响还表现在消减洪峰流量方面。相关研究表明,森林覆盖率每增加2%,约可以削减洪峰1%,当流域森林覆盖率达到最大值即100%时,森林削减洪峰的极限值为40%—50%<sup>[1]</sup>。为了揭示研究区内不同植被覆盖对洪峰的影响,本文对不同雨型下人工林流域和天然次生林流域次降雨径流作统计分析。结果显示在各雨型下植被条件较好的天然次生林流域消减洪峰的效果皆显著好于人工林流域。在A型降雨条件下,人工林流域的洪峰流量是天然次生林流域的6.03倍;在B型降雨条件下,人工林流域的洪峰流量是天然次生林流域的4.06倍;在C型降雨条件下,人工林流域的洪峰流量是天然次生林流域的2.95倍。可以看出,在高雨强的A型降雨形式下天然次生林流域的削洪效应最明显。

由上述分析可以看到,天然次生林减少径流、削减洪峰的效果显著好于人工林。这主要是由于研究区人工林的林下植被稀疏,枯枝落叶层薄,以致与茂密的天然次生林相比,人工林的水土保持功能相对较低。因此在黄土区以小流域为单元营造水土保持防护林时,应当适当减少人工林密度,多种植低耗水的灌木等树种,并采取封山育林等措施促进次生植被的自然恢复,只有这样才能使少量的天然降水量尽可能多的储存在土壤之中,使更多地表径流转化为地下径流,以达到减少水土流失的目的。

(2) 不同雨型对流域径流的影响十分显著。对于人工林流域,A型雨下的平均洪峰流量是B、C型雨的10.08倍、3.35倍,平均径流系数是B、C型雨的1.74倍、1.14倍;对于天然次生林流域,A型雨下的平均洪峰流量是B、C型雨的6.79倍、1.64倍,平均径流系数是B、C型雨的1.29倍、1.16倍。可以看到A型雨对各流域的径流、洪峰影响最大。特别地,雨强最大的A型雨对流域洪峰的影响最显著。由此可以看出,即使在植被覆盖率很高的天然次生林流域和人工林流域,短历时强暴雨的降雨比长历时大雨量降雨更容易引发高洪峰流量的洪水。相关研究亦表明,A型雨是黄土区引起侵蚀的主要降雨形式<sup>[28]</sup>。因而防治水土流失主要应针对此类雨的降雨特征进行。

### 4 结论

(1) 天然次生林流域的年径流量、雨季径流量明显低于人工林流域,而枯季径流占年总径流量的比重大于人工林流域。

(2) 天然次生林流域消减洪峰的效果好于人工林流域,在A、B、C型降雨条件下,人工林流域单位面积的洪峰流量分别是天然次生林流域的6.03倍、4.06倍和2.95倍。天然次生林流域对高雨强的A型降雨的削

洪效应最明显。人工林流域的径流系数大于天然次生林流域,在A、B、C型降雨条件下,人工林流域的次降雨径流系数分别是天然次生林流域的4.03倍、2.97倍和4.1倍。大雨量的C型降雨在天然次生林流域和人工林流域上形成的径流差异最显著。

(3)人工林和天然次生林对不同雨型的响应不同。对于人工林流域,A型雨下的洪峰流量是B、C型雨的10.08倍、3.35倍,径流系数是B、C型雨的1.74倍、1.14倍;对于天然次生林流域,A型雨下的洪峰流量是B、C型雨的6.79倍、1.64倍,径流系数是B、C型雨的1.29倍、1.16倍。A型雨对人工林流域和天然次生林流域的径流、洪峰影响最大。特别地,雨强最大的A型雨对流域洪峰的影响最显著。

#### References:

- [1] Wang L X, Zhang Z Q. Impacts of forest vegetation on watershed runoff in dry areas. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 439-444.
- [2] Coe M T, Costa M H, Soares-Filho B S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River Land surface processes and atmospheric feedbacks. *Journal of Hydrology*, 2009, 369: 165-174.
- [3] Muzylo A, Llorens P, Valente F, Keizer J J, Domingo F, Gash J H C. A review of rainfall interception modeling. *Journal of Hydrology*, 2009, 370: 191-206.
- [4] Pyzoha J E, Callahan T J, Sun G, Trettin C C, Miwa M. A conceptual hydrologic model for a forested Carolina bay depressional wetland on the Coastal Plain of South Carolina, USA. *Hydrological Processes*, 2008, 22(14): 2689-2698.
- [5] Wei X H, Sun G, Liu S R, Jiang H, Zhou G Y, Dai L M. The forest-streamflow relationship in China: a 40-year retrospect. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1076-1085.
- [6] Yu X X, Zhang X X, Li J L, Zhang M L, Xie Y Y. Effects of vegetation cover and precipitation on the process of sediment produced by erosion in a small drainage basin of loess region. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 1-8.
- [7] Fan S X, Cheng Y C, Gao Y, Li X Y. A rainfall-runoff model associated with forest vegetation in a small watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2372-2379.
- [8] Sun G, McNulty S G, Lu J, Amatya D M, Liang Y, Kolka R K. Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern United States. *Journal of Hydrology*, 2005, 308: 258-268.
- [9] Muela M P S, Renault N L, Romero E N, Regüés D, Latron J, Bono C M, Ruiz J M G. Forests and their hydrological effects in Mediterranean mountains: The case of the central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 2008, 28(3/4): 279-266.
- [10] Wu Q X, Zhao H Y, Wang Y K. Flow production and sediment production and their processes in Chinese pine woodlands in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2): 151-157.
- [11] Huang M B, Liu X Z. Regulation effect of forest vegetation on watershed runoff in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1057-1060.
- [12] Zhang X M, Cao W H, Yu X X, Zhang M L, Wang X D, Zhu B S. Effects of land use/cover change on runoff sediment discharge in typical watershed in Loess gullied-hilly region of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 121-127.
- [13] Mu X M, Wang W L, Xu X X. The influence of the soil and water conservation on the surface runoff in the watersheds in the gully plateau region of Loess Plateau. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 2: 71-75.
- [14] Ding L X, Mu X M. The effects of soil and water conservation on temporal change of the surface runoff in watersheds. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(3): 103-106.
- [15] Zhang J J, Zhang C L, He W, Na L. Appropriate density of water and soil conservation of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* forests in loess area, North China. *Frontiers of Forestry in China*, 2008, 3(1): 79-84.
- [16] Liu G, Lindstrom M J. Conservation management effects on soil erosion reduction in the Sichuan Basin China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(2): 144-147.
- [17] Zhang J J, Zhu J Z, Wei T X. Analysis on the runoff and sediment yields of soil and water conservation forests on Loess slope in the west of Shanxi Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 1996, 18(3): 14-20.
- [18] Tang C Q, Hou X L, Gao K, Xia T Y, Duan C Q, Fu D G. Man-made versus natural forests in Mid-Yunnan, Southwestern China: Plant diversity and initial data on water and soil conservation. *Mountain Research and Development*, 2007, 27(3): 242-249.
- [19] Zhang L H, Li C Z, Yang L W. A study on functions of the vegetation cover in water and soil conservation in Jiulong hill, Beijing. *Journal of Northwest Forestry College*, 1994, 9(1): 18-21.
- [20] Wang W Z, Jiao J Y. Statistic analysis on variation of rainfall and runoff-sediment yield process on slope surface in the Loess Plateau region.

Bulletin of Water and Soil Conservation, 1996, 16(5): 21-27.

- [21] Zhang J J, Na L, Dong H B, Wang P. Hydrological response to changes in vegetation covers of small watersheds on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3597-3605.
- [22] He K N, Zhang J J, Zhu J Z. The hill slope surface flow of the forests for soil and water conservation in Western Shanxi the Loess Plateau region. *Journal of Beijing Forestry University*, 1997, 19(4): 1-5.
- [23] Chen G W. Forest hydrological effects in the upper Yangtze River valley. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 1999, 28(5): 456-459.
- [24] Zhang X M, Yu X X, Wu S H, Wei T X, Zhang X P. Effects of forest vegetation on runoff and sediment production on sloping lands of Loess area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1613-1617.
- [25] Xu X L, Zhang K L, Luo L F, Kong Y P, Pang L. Relations between rain characters and sediment yielding and runoff on embankment slope of Qinghai-Tibet Road. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 22-74.
- [26] Song Y H, Ma J H. SWAT-Aided research on hydrological responses to ecological restoration: a case study of the Nanhe River Basin in Hua jialing of Longxi Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 636-644.
- [27] Wang S P, Zhang Z Q, Sun G, Zhang M L, Yu X X. Effects of land use change on hydrological dynamics at watershed scale in the Loess Plateau—A case study in the Lüergou watershed, Gansu Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1): 48-54.
- [28] Wang Z L, Jin X Y, Ma C Y, Tan Z X. Research on processes and responses of rainfall-runoff-sediment yield on Loess hillslope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 24-28.

#### 参考文献:

- [1] 王礼先, 张志强. 干旱地区森林对流域径流的影响. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 439-444.
- [6] 余新晓, 张学霞, 李建牢, 张满良, 谢媛媛. 黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响. *生态学报*, 2006, 26(1): 1-8.
- [7] 范世香, 程银才, 高雁, 李晓晏. 考虑森林植被影响的小流域降雨径流模型. *生态学报*, 2008, 28(5): 2372-2379.
- [10] 吴钦孝, 赵鸿雁, 汪有科. 黄土高原油松林产地流沙及其过程研究. *生态学报*, 1998, 18(2): 151-157.
- [11] 黄明斌, 刘贤赵. 黄土高原森林植被对流域径流的调节作用. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1057-1060.
- [12] 张晓明, 曹文洪, 余新晓, 张满良, 王向东, 朱毕生. 黄土丘陵沟壑区典型流域径流输沙对土地利用/覆被变化的响应. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 121-127.
- [13] 穆兴民, 王文龙, 徐学选. 黄土高塬沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响. *水利学报*, 1999, 2: 71-75.
- [14] 丁琳霞, 穆兴民. 水土保持对小流域地表径流时间特征变化的影响. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(3): 103-106.
- [17] 张建军, 朱金兆, 魏天兴. 晋西黄土区坡面水土保持林产地流沙的观测分析. *北京林业大学学报*, 1996, 18(3): 14-20.
- [19] 张理宏, 李昌哲, 杨立文. 北京九龙山不同植被水源涵养作用的研究. *西北林学院学报*, 1994, 9(1): 18-21.
- [20] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析. *水土保持通报*, 1996, 16(5): 21-27.
- [21] 张建军, 纳磊, 董煌标, 王鹏. 黄土高原不同植被覆盖对流域水文的影响. *生态学报*, 2008, 28(8): 3597-3605.
- [22] 贺康宁, 张建军, 朱金兆. 晋西黄土残塬沟壑区水土保持林坡面径流规律研究. *北京林业大学学报*, 1997, 19(4): 1-5.
- [24] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 魏天兴, 张学培. 黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1613-1617.
- [25] 徐宪立, 张科利, 罗利芳, 孔亚平, 庞玲. 青藏公路路堤边坡产流产沙与降雨特征关系. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 22-74.
- [26] 宋艳华, 马金辉. SWAT模型辅助下的生态恢复水文响应——以陇西黄土高原华家岭南河流域为例. *生态学报*, 2008, 28(2): 636-644.
- [27] 王盛萍, 张志强, 孙阁, 张满良, 余新晓. 黄土高原流域土地利用变化水文动态响应——以甘肃天水吕二沟流域为例. *北京林业大学学报*, 2006, 28(1): 48-54.
- [28] 王占礼, 靳雪艳, 马春艳, 谭贞学. 黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 24-28.