

# 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制\*

——以人工油松林和次生山杨林为例

潘成忠<sup>1,2,3</sup> 上官周平<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; <sup>2</sup>北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; <sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039)

**【摘要】** 以黄土区两种常见森林植被(次生山杨林和人工油松林)长期定位观测试验为基础,从水量平衡和径流产沙机理出发,分析了次降雨条件下两种林地和荒地坡面产流产沙过程。结果表明,次降雨量在5.0~50.0 mm范围内,油松林和山杨林的林冠和枯枝落叶层总截留率分别为15.45%~56.80%和20.56%~47.81%,且随降雨量的增大而减小。与荒坡地相比,林地土壤入渗性能显著增强,尤其是0~20 cm土层。分析表明,在一般降水条件下林地无径流产生;而在降雨雨强为2.5 mm·min<sup>-1</sup>和历时30 min条件下,山杨林地无地表径流产生,荒坡地的径流流速和径流挟沙浓度均为油松林地的23.5倍,而其径流剪切力和径流能量均为后者的8倍;油松林地的径流量和产沙量比荒地分别减少了87.6%和99.4%,与径流小区多年(1988~2000)观测平均值(分别为87.0%和99.9%)相近。

**关键词** 水土保持 产流产沙 森林植被 黄土高原

**文章编号** 1001-9332(2005)09-1597-06 **中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

**Generation mechanism of woodland runoff and sediment on Loess Plateau under hypo-rainfall—A case study of artificial *P. tabulaeformis* and secondary natural *P. dadidiana* stands.** PAN Chengzhong<sup>1,2,3</sup>, SHANGGUAN Zhouping<sup>1</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Education Ministry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China; <sup>3</sup>Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(9): 1597~1602.

Based on the long-term observation and from the viewpoints of water balance and runoff-and sediment generation, this paper studied the generation processes of runoff and sediment on two typical woodlands, artificial *P. tabulaeformis* and secondary natural *P. dadidiana*, and uncultivated slope-land in Loess Plateau under hypo-rainfall. The results showed that within the range of 5.0~50.0 mm rainfall, the total interception of canopy and litter was 15.45%~56.80% for *P. tabulaeformis* and 20.56%~47.81% for *P. dadidiana*, and decreased with increasing rainfall. Woodlands had a higher soil water infiltration capacity than uncultivated slope-land, especially in 0~20 cm soil layer. Both the two woodlands did not generate runoff under regular rainfall. Under the assumed rainfall of 2.5 mm·min<sup>-1</sup> intensity and 30 min duration, *P. dadidiana* stand did not produce runoff, but the runoff velocity and sediment-carrying capacity of uncultivated slope-land were 23.5 times, and runoff shearing stress and energy were 8 times as much as *P. tabulaeformis* stand. The runoff-and sediment generation on *P. tabulaeformis* stand decreased by 87.6% and 99.4%, respectively, compared with those on uncultivated slope-land, which was well accorded with the average observed value in runoff plots during 1988~2000. The theoretical analysis on the generation mechanism of woodland runoff and sediment may be effective to evaluate the benefits of forest in soil and water conservation.

**Key words** Soil and water conservation, Runoff-and sediment generation, Forest stand, Loess Plateau.

## 1 引言

黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区之一。由于人类不合理地开发利用自然资源,导致植被破坏,使该地区脆弱的生态环境更加恶化。随着对森林植被生态功能的广泛关注,各国科学家进一步加强了对森林植被与生态环境相互作用机理的研究,森林植被对产流产沙过程的影响研究也广受关

注<sup>[17,27,28]</sup>。一般认为,森林植被减少可以增加流域径流量,造林可以减少流域径流量,但其对流域径流量的影响幅度存在较大差异<sup>[1,4,7,14]</sup>。在我国,关于森林植被结构与功能变化对年径流量的影响一直存

\* 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB111502)和国家自然科学基金资助项目(30230290, 90102012)。

\*\* 通讯联系人。

2005-04-06 收稿, 2005-05-12 接受。

在着不同的看法<sup>[2,6,9~11,18]</sup>. RUSLE<sup>[13]</sup>和 WEPP<sup>[8]</sup>是目前应用较为广泛的侵蚀产沙预报模型,由于森林植被影响坡面产流产沙过程的许多规律尚未得到很好的解释,上述模型对森林植被影响因素的考虑过分简化,不足以揭示森林植被对坡面产流产沙的影响机理.

坡面产流过程是降雨与土壤界面之间的响应过程.由于植被对降水再分配过程的影响,以及降雨和地表土层入渗性能的时空变异,使得林地产流产沙过程研究较裸地困难得多.以往对林地径流产沙研究主要针对具体地点进行观测,而对其产流产沙过程的理论探讨不多.由于不同试验点的降雨特性、森林类型、下垫面条件等不尽相同,因而出现上述森林植被对径流量影响的分歧,而通过对森林植被产流产沙过程的理论分析有助于解决这一分歧.本文试图采用动态分析方法,通过对黄土高原地区两种典型水土保持林(次生山杨林和人工油松林)的降雨产流产沙过程进行分析,以期推动林地坡面产流产沙研究向纵深方向发展,同时为黄土高原地区森林植被的水土保持效益评价提供理论依据.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 研究区概况

宜川森林水文生态站设在陕西省宜川县铁龙湾林场,地处黄龙山林区东缘(35°39'N, 110°06'E).地貌为黄土梁状丘陵,海拔 860~1 200 m,坡度 20°~25°,平均气温 9.7℃,≥0℃的积温 4 010.8℃,≥10℃的积温 3 529.4℃,无霜期 180 d.年均降水量 574 mm,其中 7~9 月降雨占年降水量的 60%以上.降水量的年际变幅较大,丰水年最大降水量达 843.5 mm,枯水年最小降水量为 408.4 mm.每年有 1~3 次短历时、大雨强(≥1.0 mm·min<sup>-1</sup>)的大暴雨出现,为主要的侵蚀性降水.年均水面蒸发量 1 543 mm,相当于年降水量 2.6 倍.土壤为褐色森林土,林下土壤表层有机质含量为 1.36%.土壤质地为中壤土,结构较疏松,平均比重 2.635,表层容重 1.1 g·cm<sup>-3</sup>左右.林下表层土壤孔隙丰富,土壤入渗速率高.地带性植被为暖温带落叶阔叶林和森林草原.

供观测的人工油松林(*Pinus tabulaeformis*)为常绿针叶林,20 世纪 60 年代中期植造,经过 3 次抚育间伐,目前密度为 2 000 株·hm<sup>-2</sup>,平均树高 11~13 m,胸径 11~13 cm,郁闭度 0.7~0.8.林下灌木有胡颓子(*Elaeagnus umbellata*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、葱皮忍冬(*Lonicera ferdinandii*)等,草本植物有大披针叶苔草(*Carex lanceolata*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelini*)等,盖度约在 30%;林地枯枝落叶厚 2~3 cm,蓄积量 16.0 t·hm<sup>-2</sup>.

观测的山杨林(*Populus davidiana*)属中龄林,为天然次生落叶阔叶林,分布于山阴坡,密度为 2 100 株·hm<sup>-2</sup>,平均

树高 10~12 m,胸径 11~13 cm,郁闭度 0.7~0.8.林下植被与人工油松林地相似.林地枯枝落叶 2~3 cm,蓄积量为 6.6~8.8 t·hm<sup>-2</sup>.荒地多年退耕地,地面基本无覆盖.

### 2.2 测定方法

用自记雨量计测定林外降雨,在林内选择生长适中的林分通过雨量筒测定林内降雨,并计算林冠截留;枯枝落叶截留采用在雨量筒承雨口处放一铁圈纱网,其上放置林地原状枯枝落叶测定;用标准径流小区(20 m×5 m)观测两种林地和荒地的径流产沙量.

## 3 结果与分析

### 3.1 产流过程分析

3.1.1 坡面水量平衡 通常,林下降水首先被地被物层再次截留,剩余部分则以径流和入渗方式补予地表水和土壤水.次降雨坡面水量平衡方程为:

$$P = E + R + f(\text{荒地}) \quad (1)$$

$$P = E + R + I_c + I_l + I_s + f(\text{林地}) \quad (2)$$

式中, $P$ 为次降水量; $E$ 为蒸散量; $R$ 为径流量,由于黄土高原地区土层深厚,这里主要指地表径流量; $I_c$ 为冠层截留量; $I_l$ 为枯枝落叶层截留量; $I_s$ 为树干截留量; $f$ 为入渗量.

对于次降雨而言,蒸散量( $E$ )很小,可忽略不计.对比式(1)和式(2)可以看出,林地降水分配除径流和入渗外,还增加了冠层、树干以及枯落物层对降水的截留部分.树干截留量  $I_s$  一般很小,可忽略不计.所以,林地与荒地的主要差异在于冠层和枯枝落叶层截留,以及土壤渗透性能的不同.

3.1.2 林地截留 观测表明<sup>[23]</sup>,两种林地林冠截留量均随次降雨量的增大而增加,而截留率均随降雨量的增大而减小(表 1),反映了林冠截留阈值的存在<sup>[19]</sup>.在观测降雨量级范围内,山杨林和人工油松林的枯枝落叶层截留率差异较小,均在 6.7%~28.7% 之间变化,且均随降雨量增大而减小(表 1).

根据表 1,采用模型  $I = \alpha P^m$  对两种林分总截留率  $I_t$ (%) 进行拟合:

$$I_t = 266.52P^{-0.761} \quad R^2 = 0.9895(\text{油松林})$$

$$I_t = 101.71P^{-0.437} \quad R^2 = 0.8656(\text{山杨林})$$

(3)

其中, $I_t$ 为总截留率; $P$ 为降雨量级.经检验,均呈显著水平,说明模型具有一定精度.为了便于计算,假定该模型可以进行外推.

表 1 人工油松林和山杨林不同降雨量级的截留率

Table 1 Total interception rate of two woodlands under different single rainfall

降雨量级 Rainfall (mm)	林分类型 Stand type	林冠截留率 Canopy interception (%)	枯枝落叶层截留率 Litter interception (%)	总计 Total (%)
5.0~10.0	I	28.10	28.70	56.80
	II	21.31	26.50	47.81
10.1~20.0	I	18.82	17.40	36.22
	II	14.47	11.30	25.77
20.1~30.0	I	11.47	10.00	21.47
	II	12.00	11.73	23.73
30.1~40.0	I	9.65	7.60	17.25
	II	12.78	9.80	22.58
40.1~50.0	I	8.75	6.70	15.45
	II	12.00	8.56	20.56

I. 油松林 *P. tabulaeformis*; II. 山杨林 *P. dadidiana*.

**3.1.3 林地增强土壤渗透性能** 由表 2 可见, 荒坡地、山杨和油松林地的土壤稳定入渗率均随土层深度的增大而降低。荒山坡地土壤的稳定入渗率在  $0.2 \sim 0.65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  之间变化, 而林地土壤的渗透性较荒地显著提高, 特别是在土壤表层和次表层, 这可能主要是林地表层土壤枯落物的分解和根系改善了土壤结构。坡面的产流过程与上层土壤入渗关系最为密切<sup>[12]</sup>, 山杨林地  $0 \sim 10 \text{ cm}$  和  $10 \sim 20 \text{ cm}$  土壤的稳定入渗率分别达  $8.15$  和  $5.11 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 而荒山地只有  $0.50$  和  $0.65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。这与侯喜禄等<sup>[5]</sup>的结论相似。

表 2 林地与荒山坡面不同土层土壤入渗性能

Table 2 Infiltration properties of different soil depth on woodlands and uncultivated slopeland

土层 Soil depth (cm)	土壤稳渗率 Steady infiltration rate ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )		
	A	B	C
0~10	8.82	7.42	0.50
10~20	7.70	1.81	0.65
20~40	2.70	1.10	0.45
40~60	0.75	0.63	0.30
60~80	0.38	0.53	0.25
80~100	0.25	0.37	0.20

A: 山杨林地 *P. dadidiana* stand; B: 人工油松林地 *P. tabulaeformis* stand; C: 荒坡 Uncultivated slopeland. 下同 The same below.

$0 \sim 60 \text{ cm}$  土层山杨林地的土壤稳渗率均不同程度地大于人工油松林。这可能主要是由于山杨林为天然次生林, 长期的枯落物分解以及微生物活动使林地土壤比人工油松林地结构更加疏松多孔, 增

表 3 次降雨条件下林地和荒山坡面产流过程

Table 3 Runoff processes of different sloopelands under single rainfall

坡面类型 Land type	总截留率 Total interception (%)	净雨强 Net rainfall density ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	开始产流时间 Initial runoff time(min)	径流深 Flow depth (mm)	径流量 Runoff (mm)	径流系数 Runoff coefficient
A	15.42	2.11	-	0	0	0
B	9.97	2.25	13.33	0.44	7.42	0.099
C	0	2.50	0	2.00	60.00	0.800

次降雨坡面雨强为  $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  降雨历时 30 min Rainfall intensity on sloopeland is  $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  within 30 min.

大了土壤的渗透性能。

**3.1.4 坡面产流过程** 由表 2 可知, 林下净雨强  $I_{\text{净雨}} \ll$  表层稳渗率  $f_{\text{表土}}$ , 则无地表径流产生。但对于林地的下层土壤, 当  $I_{\text{净雨}} > f_j$ , 入渗受阻, 首先可能产生壤中流。由于黄土的垂直节理, 土壤水分侧向流动微弱, 最后主要发展成表层流, 也可称为饱和地面径流, 说明林地有一定土层深度形成蓄满产流。

假设地表均匀、平坦, 土层达到饱和时的最大吸水量可由下式计算:

$$h = h_{\pm}(\theta_0 - \theta_v) \quad (4)$$

式中,  $h$  为吸水量 ( $\text{mm}$ );  $h_{\pm}$  为土层厚度 ( $\text{mm}$ );  $\theta_0$  为土壤饱和持水量;  $\theta_v$  为雨前土壤含水量, 其中  $\theta_0$  和  $\theta_v$  均以体积含水量表示, 这里取  $(\theta_0 - \theta_v) \approx 0.3$ 。

在黄土高原地区, 水土流失往往是由几场暴雨形成的, 根据上述林地截留和不同土层的入渗性能, 在不考虑坡度和地表结皮对降雨入渗的影响以及降雨过程对截留的影响下, 分析不同坡面的产流过程。

当地面净雨强  $I_{\text{净雨}} > f_j$  (第  $j$  层土壤的入渗率) 且地面净雨量  $P_{\text{净}} > \sum_{i=1}^{j-1} h_i$  时, 才会有径流产生, 此时

开始产流时间 ( $T$ ) 为:  $T = \sum_{i=1}^{j-1} \left( \frac{h_i}{f_i} \right)$ , 其中  $h_i$  为第  $i$  层土壤达到饱和时的吸水量 ( $\text{mm}$ );  $f_i$  为第  $i$  层土壤的入渗率 ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $j$  为  $I_{\text{净雨}} > f_j$  的土层。

径流深 ( $h$ ):  $h_j = I_{\text{净}} \cos \theta - f_j$ , 其中  $\theta$  为坡度。

径流量 ( $Q$ ): 若  $(P_{\text{净}} - \sum_{i=1}^j h_i) \geq h_i$ , 则

$$Q = \sum_{i=f}^m \left[ \frac{h_i}{f_i} (I_{\text{净}} - f_i) \right]$$

若  $(P_{\text{净}} - \sum_{i=1}^j h_i) < h_i$ , 则

$$Q = \frac{P_{\text{净}} - \sum_{i=1}^j h_i}{I_{\text{净}}} \cdot (I_{\text{净}} - f_j)$$

分析表明, 即使在降雨历时为 30 min, 在  $1.0 \sim 2.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  雨强情况下, 林地坡面仍无径流产生。由表 3 可以看出, 在坡面雨强为  $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  和历时 30 min 条件下, 山杨林不产流, 而油松林地

产生少量径流,可能主要是山杨林地更加深厚的土壤腐殖质层缘故.荒地在降雨后立即产流,而油松林地比荒坡地产流时间推迟 13 min.与荒地相比,油松林地径流量减少 87.6%.这与径流小区多年(1988~2000)观测平均值(87.0%)接近.

### 3.2 产沙过程分析

**3.2.1 径流剪切力与径流能量** 径流在沿坡面运动过程中对土壤接触面产生径流冲刷力.它冲刷表层土壤,破坏土粒结构和分散土粒,从而为径流搬运提供侵蚀物质,通常采用水力学中水流切应力表示:

$$\tau = \gamma RJ \quad (5)$$

式中,  $\tau$  为切应力;  $\gamma$  为水的容重;  $R$  为水力半径,一般取水深  $h$ ;  $J$  为水力坡度,在坡度不大时,一般取水流的下垫面地表坡度.

土壤侵蚀做功的能量来源于径流,单位面积上的平均径流能量计算公式为<sup>[30]</sup>:

$$E = \frac{\rho g}{4} L \sin 2\theta \cdot p_h \quad (6)$$

式中,  $E$  为坡面单宽径流能量;  $L$  为坡面长;  $p_h$  为土层厚度;  $p_h = \int_0^t (I_{\text{净}} - f) dt$ , 其中  $I_{\text{净}}$  为净雨强;  $f$  为渗透率;  $\rho$  为水密度;  $g$  为当地的重力加速度;  $\theta$  为坡度.

**3.2.2 径流产沙** 从泥沙运动力学方面分析,水流对泥沙的作用主要包括水流的剥蚀和搬运作用.由于天然河流以及坡面流中泥沙的主要来源是悬移质,这里主要考虑坡面泥沙的悬移质挟沙力.

根据泥沙运动力学,泥沙的粒径与起动流速平方成正比,即  $v \propto d^{1/2}$ ,而泥沙的重量与其粒径的三次方成正比,因此径流移动泥沙的颗粒重量与起动流速的六次方成正比,即

$$M = Cv^6 \quad (7)$$

式中,  $M$  为径流移动泥沙重量;  $C$  为流速系数;  $v$  为径流起动流速.可见流速对泥沙的移动具有极其重要的意义.

明渠均匀流的 Chézy 公式和 Manning 公式:

$$\begin{cases} v = C \sqrt{RJ} \\ C = \frac{1}{n} R^{1/6} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $C$  为谢才系数;  $n$  为粗糙系数;  $R$  为水力半径,一般取水深  $h$ ;  $J$  为水力坡度.

由式(8)可得

$$v = \frac{1}{n} J^{1/2} h^{2/3} \quad (9)$$

目前较常见的水流挟沙能力计算公式为

$$s = k \left( \frac{v^3}{ghw} \right)^m \quad (10)$$

式中,  $s$  为径流挟沙浓度;  $h$  为径流深;  $v$  为径流流速;  $g$  为当地的重力加速度;  $w$  为泥沙的沉降速度;  $k, m$  为根据实测资料所确定的经验系数.

由式(10)可以看出,径流的挟沙能力与流速、水深等有关.但由于缺乏各种植被径流小区泥沙资料,所以对式中系数的确定存在一定困难.考虑到森林植被作用而造成低含沙径流,可采用如下径流挟沙浓度公式<sup>[3]</sup>:

$$s_v = k \cdot \frac{h^{2/3} J^{3/2}}{nw} \quad (11)$$

其中,  $k$  为常数.式(11)表明,在一定坡降下,由于森林植被使坡面糙率增大,水深减小,进而径流挟沙能力降低.比较式(9)和式(11)发现,挟沙力与流速成正比例关系.

**3.2.3 坡面产沙过程** 径流产沙与坡面流速密切相关,而流速主要由地表径流水深和糙率系数所决定,因此坡面糙率的研究对于研究土壤水蚀有着重要意义<sup>[21,26]</sup>.由于受到地表状况等多种因素的影响,不同土地利用类型的糙率系数各不相同.张洪江等<sup>[25]</sup>通过放水试验对油松和杨树林地的糙率进行了研究,表明杨树枯落物的糙率系数大于油松,且厚度对其影响的敏感性前者也大于后者,并建立了回归方程:

$$\begin{aligned} n &= 0.2143 G^{0.3331} (\text{油松}) \\ n &= 0.1073 G^{0.4172} (\text{杨树}) \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $n$  为糙率系数;  $G$  为枯落物干重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ).

由于林地糙率受地形、林分类型、密度、活地被层以及枯落物数量等多种因素影响,给林地糙率的确定带来很多困难.下面提出确定林地糙率的两种简便方法.

对于保护较好的天然林,枯落物厚度与林分密度具有一定关系,可用下式:

$$n_t = \frac{n_l}{p} \quad (13)$$

其中,  $n_t$  为林地总糙率,  $n_l$  为枯落物糙率,  $p$  为枯落物层对总糙率的贡献率.

而对于密度、树龄等较为均一的人工林或进行间伐过的天然林,考虑人为因素对林地枯落物的影响,可把其对糙率的贡献看作一定值,即

$$n_t = k + n_l \quad (14)$$

其中,  $k$  为除枯落物层外,林分其它部分对地表糙率的贡献,为一常数.

表 4 次降雨条件下不同坡面径流产沙特征

Table 4 Characteristics of runoff and sediment on different slopelands under single rainfall

坡面类型 Land type	糙率 Roughness coefficient	径流深 Flow depth (mm)	流速 Velocity ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	剪切力 Shearing stress ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )	径流能量 Runoff energy ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ )	泥沙颗粒重 Sediment particle weight	挟沙力 Sediment-carrying capacity
A	0.1945	0	0	0	0	0	0
B	0.1505	0.229	0.017	1.07	284.20	2.40E-11C	7.92E-03k
C	0.0250	1.766	0.399	8.23	2298.13	4.04E-03C	1.86E-01k

次降雨强度为  $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  降雨历时 30 min Rainfall density is  $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  with 30 min; C 和 k 均为常数 C and k are constant coefficients.

根据野外调查,对两种林地均采用式(14),且均取  $k \approx 0.05$ ,则由式(12)和式(14)可确定两种林分地表糙率.荒山地糙率取水力学中断面变化无植物土渠的正常糙率 0.025.分析降雨历时为 30 min、平均雨强为  $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  条件下,不同坡面径流小区(坡度 =  $25^\circ$ , 坡长 = 20 m)的产沙特征值见表 4.结果表明,林地糙率远大于荒山坡面,油松林地的径流深是荒地的 7.7 倍;荒山坡地的流速和径流挟沙能力是人工油松林地的 23.5 倍,而山杨林地无径流泥沙产生,从而达到有效保持水土的功能.油松林地的径流剪切力和径流能量均为荒坡地的 8 倍左右.

荒坡地径流移动泥沙颗粒重是油松林的  $2 \times 10^8$  倍,即前者搬运的泥沙直径是后者的 550 倍.因此对于林地运动泥沙的粒径很小,应用悬移质输沙率代替泥沙的挟沙力是可行的.荒坡地径流挟沙浓度为油松林地的 23.5 倍.由径流量与径流挟沙浓度可得,油松林地的产沙量比荒坡地减少了 99.4%.这与径流小区多年(1988~2000)观测平均值接近,两种林地的产沙量比荒地均减少了 99.9%.

#### 4 讨 论

林冠和枯枝落叶层的截留以及林地土壤渗透性增强显著削减了坡面径流,而径流的减少以及林地糙率的增大降低了产生侵蚀的径流能量,有效地控制了坡面泥沙的产生,从而实现森林植被保持水土的功能.尽管森林植被具有巨大的水土保持效用,但不同林分之间存在差异,即使在 30 min 坡面雨强为  $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  条件下,山杨林地无径流泥沙产生,而油松则有少量径流泥沙.唐克丽等<sup>[15]</sup>在陕西子午岭林区通过人工降雨试验研究表明,在雨强 1.26 和  $1.91 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、降雨历时 30 min 情况下,坡度为  $20^\circ$  的次生林地坡面仍无径流产生,当雨强达到  $2.37 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,坡面才有少量产流.

多年观测表明,林地径流小区的年径流量主要是由几场较大降雨产生,而荒坡地的年侵蚀量也主要来自于这几场降雨<sup>[23,24]</sup>.通常,次降雨量大于 10 mm 和长历时平均雨强大于  $0.1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  林地就

有径流产生<sup>[22]</sup>,与理论分析存在较大差异.这主要是由于对林地降雨再分配过程考虑不足,以及坡面微地形和土壤前期含水量的影响等.尽管如此,基于黄土高原坡面径流产沙主要来自于几场暴雨,理论分析得出的林地相对于荒地的减水减沙效益与多年观测值较为一致<sup>[23]</sup>.这表明理论分析林地坡面的径流产沙机制对森林的水土保持效益评价仍具有一定的指导意义.在黄土高原地区,大量研究也证实森林植被具有显著的减水减沙效应<sup>[16,18,20,29]</sup>.然而目前迫切需要解决的问题是对坡面降雨的再分配过程进行耦合研究,特别是森林不同垂直层次对降雨截留的过程研究,以及微地形对土壤入渗和径流过程的影响等.这些均是准确把握林地降雨产流条件与动态过程的基础.

黄土高原以流域为基本单元,开展的水土流失综合治理是当前改善该区生态环境的主要措施.对于流域而言,由于受到流域内植被类型、下地被层、地形、土壤等众多因素影响,给产流产沙的物理过程分析带来不便.而坡面是水土流失的最基本单元,通过对某一林分坡面产流产沙的过程分析,为大尺度的流域研究奠定基础,进而推动森林植被的生态水文以及水土保持效应过程研究向纵深方向发展,同时为黄土高原地区森林植被恢复重建提供理论依据.

#### 参考文献

- Bosch JM, Hewlett JD. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J Hydrol*, 55: 3~23
- Chen J-F(陈军锋), Li X-B(李秀彬). 2004. Simulation of hydrological response to land-cover changes. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 15(5): 833~836(in Chinese)
- Fei X-J(费祥俊), Shu A-P(舒安平). 1998. Investigation on sediment transport capacity with high concentration for fluvial river. *J Hydr Eng(水利学报)*, 11: 38~43(in Chinese)
- Groke J. 1999. Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forests, South-eastern Australian. *J Hydrol*, 216: 56~77
- Hou X-L(侯喜禄), Bai G-S(白岗栓), Cao Q-Y(曹清玉). 1995. Contrast study on soil infiltration capacity and anti-scourability in *Robinia pseudoacacia*, *Caragana microphylla* and *Hippophae rhamnoides* woodlands. *J Soil Water Cons(水土保持学报)*, 9(3): 90~95(in Chinese)
- Hunag M-B(黄明斌), Liu X-Z(刘贤赵). 2002. Regulation effect

- of forest vegetation on watershed runoff in the Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 13(9):1057~1060(in Chinese)
- 7 Johnson RC, Whitehead PG. 1993. An introduction to the research in the Balquhider experimental catchments. *J Hydrol*, 145:231~238
  - 8 Lafflen JM, Lwonard J, Foster GR. 1991. WEPP a new generation of erosion prediction technology. *J Soil Water Cons*, 46(1):34~38
  - 9 Liu C-M(刘昌明), Zhong J-X(钟骏襄). 1978. Pre-analysis on the effects of the forest to the runoff in the Loess Plateau. *Acta Geogr Sin*(地理学报), 33(2):112~127(in Chinese)
  - 10 Liu S-R(刘世荣), Wen Y-G(温远光), Wang B(王兵), et al. 1996. *Ecohydrological Functions of Forest Ecosystems in China*. Beijing: China Forestry Press. (in Chinese)
  - 11 Ma X-H(马雪华). 1993. *Forest Hydrology*. Beijing: China Forestry Press. (in Chinese)
  - 12 Rui X-F(芮孝芳). 1991. *Theory on Runoff Generation*. Nanjing: Hehai University Press. (in Chinese)
  - 13 Renard GR, Foster GR, Weesies GA. 1991. RUSLE revised universal soil loss equation. *J Soil Water Cons*, 46(1):30~33
  - 14 Stednick JD. 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *J Hydrol*, 176:79~95
  - 15 Tang K-L(唐克丽), Zhang K-L(张科利), Zheng F-L(郑粉莉), et al. 1993. Analyzing on natural erosion and man-made accelerated erosion in the Ziwuling forest area. *Memoir Inst Soil Water Cons Chin Acad Sci*(中国科学院水土保持研究所集刊), 17:17~28(in Chinese)
  - 16 Tang K-L(唐克丽). 2004. *Soil and Water Conservation in China*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
  - 17 Troendle CA. 1983. The potential for water yield argumentation from forest management in Rocky Mountain region. *Water Resour Bull*, 19:359~373
  - 18 Wang L-X(王礼先), Zhang Z-Q(张志强). 2001. Impact of forest vegetation on watershed runoff in dryland areas. *J Nat Resour*(自然资源学报), 16(5):439~444(in Chinese)
  - 19 Wang Y-H(王彦辉), Yu P-T(于澎涛), Xu Y-D(徐德应), et al. 1998. A preliminary study on transformation of rainfall interception models and parameter's variation. *J Beijing For Univ*(北京林业大学学报), 20(6):25~30(in Chinese)
  - 20 Wei T-X(魏天兴). 2002. Sediment sources and effects of vegetation on erosion control in the gully-hilly loess area in north China. *J Beijing For Univ*(北京林业大学学报), 24(5):19~24(in Chinese)
  - 21 Wu C-W(吴长文), Wang L-X(王礼先). 1995. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of forested slopeland. *J Soil Water Cons*(水土保持学报), 9(2):32~38(in Chinese)
  - 22 Wu Q-X(吴钦孝), Zhao H-Y(赵鸿雁), Wang Y-K(汪有科). 1998. Flow production and sediment production and their processes in Chinese pine woodlands in the Loess Plateau. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 18(2):151~157(in Chinese)
  - 23 Yang W-Z(杨文治), Wu Q-X(吴钦孝). 1998. *Forest and Grassland Vegetation Construction and its Sustainable Development in Loess Plateau*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
  - 24 Yu X-X(余新晓), Bi H-X(毕华兴), Zhu J-Z(朱金兆), et al. 1997. Soil and water conservation by forest vegetation in loess area. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), 21(5):433~440(in Chinese)
  - 25 Zhang H-J(张洪江), Kitahara Hikaru, Endo Taizo. 1994. The effect of several kinds of litters to the roughness coefficient. *J Soil Water Cons*(水土保持学报), 8(2):4~10(in Chinese)
  - 26 Zhang H-J(张洪江), Kitahara Hikaru, Endo Taizo. 1995. A study on effect of forest land condition upon roughness coefficient in the west of Shanxi Province. *Bull Soil Water Cons*(水土保持通报), 15(2):10~21(in Chinese)
  - 27 Zhang Z-Q(张志强), Wang L-X(王礼先), Yu X-X(余新晓), et al. 2001. Impacts of forest vegetation on runoff generation mechanisms: A review. *J Nat Resour*(自然资源学报), 16(1):79~84(in Chinese)
  - 28 Zhang Z-Q(张志强), Yu X-X(余新晓), Zhao Y-T(赵玉涛), et al. 2003. Advance in researches on the effect of forest on hydrological process. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 14(1):113~116(in Chinese)
  - 29 Zhao H-Y(赵鸿雁), Wu Q-X(吴钦孝). 2001. Study on sediment and yield runoff of artificial Chinese pine woodland in Loess Plateau. *Adv Nat Sci*(自然科学进展), 11(8):829~834(in Chinese)
  - 30 Zhao X-G(赵晓光), Shi H(石辉). 2002. Impact of gentle slopeland flow on processes of soil particle detachment. *J Mount Sci*(山地学报), 20(4):427~431(in Chinese)

---

作者简介 潘成忠,男,1980年生,博士生.主要从事生态水文与水土保持方面的研究,发表论文10多篇. Tel: 029-87019107; E-mail: mlpcz@sina.com

---