

文章编号: 1001-1498(2006)05-0595-05

华北落叶松枯落物覆盖对地表径流的拦阻效应

何常清^{1,2}, 于澎涛^{2*}, 管伟², 王彦辉², 袁玉欣¹,
郭明春², 杜阿朋¹, 董晓红²

(1. 河北农业大学林学院, 河北 保定 071000; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要:在宁夏固原六盘山叠叠沟小流域坡面径流小区(长 0.9 m, 宽 0.5 m)内进行了 10 种枯落物覆盖量(0.0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0 t·hm⁻²)、5 个入口流量(10, 20, 30, 40, 60 mL·s⁻¹)的地表径流试验。结果表明:当枯落物覆盖量从 0.0 t·hm⁻²增加到 25.0 t·hm⁻²时,地表径流流速与无枯落物覆盖相比减小了 57.50%~72.27%;地表径流流速随入口流量增加而明显加大,尤其是无枯落物覆盖时增加最快;在坡度为 14° 的条件下,枯落物覆盖对地表径流流速的阻延值 V (cm·s⁻¹)与单宽流量 q (mL·s⁻¹·cm⁻¹)、枯落物覆盖量 G (t·hm⁻²)的关系为: $V = 3.6177q^{0.5075}G^{0.4315}$ ($R^2 = 0.9102$);枯落物覆盖量增加使地表曼宁阻力系数 n 值加大,在枯落物覆盖量小于 10.0 t·hm⁻²时, n 值随枯落物量增加而急剧加大;当枯落物覆盖量在 10.0~25.0 t·hm⁻² 范围内增加时, n 值的加大趋势逐渐变缓; n 值与枯落物覆盖量之间呈较好的二项式关系。

关键词:华北落叶松;枯落物覆盖;地表径流;流速;曼宁阻力系数

中图分类号: S715

文献标识码: A

The Effect of Ground Covering by Litter of *Larix principis-rupprechtii* to Reducing Velocity of Surface Runoff

HE Chang-qing^{1,2}, YU Peng-tao², GUAN Wei², WANG Yan-hui², YUAN Yu-xin¹,
GUO Ming-chun², DU A-peng¹, DONG Xiao-hong²

(1. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China;

2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: For studying the effect of ground covering by *Larix principis-rupprechtii* litter on reducing the velocity of surface runoff, the experiment was conducted with 0.9 m × 0.5 m plots on slopes in Diedieyou small watershed of Liupan Mountain in Guyuan, Ningxia. The treatments of 10 litter coverage (0.0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 15.0, 20.0 and 25.0 t·hm⁻²) and 5 input flux (10, 20, 30, 40 and 60 mL·s⁻¹) were used. The results showed that compared with the treatment with no litter coverage, the surface runoff velocity was reduced by 57.50%~72.27% when the litter coverage varies from 0.0 to 25.0 t·hm⁻². The surface runoff velocity had an evident increase with increasing input flux, especially the fastest increase in the case of without litter coverage. On the slope of 14°; the relation among the reduced runoff velocity (V , cm·s⁻¹), the flow of unit width (q , mL·s⁻¹·cm⁻¹), and litter coverage (G , t·hm⁻²) was: $V = 3.6177q^{0.5075}G^{0.4315}$ ($R^2 = 0.9102$). The Manning resistant coefficient (n) increased with litter coverage. When the litter coverage was less than 10.0 t·hm⁻², the value

收稿日期: 2006-01-18

基金项目: 国家重大基础研究项目(2002CB111501)、国家自然科学基金重点项目(30230290)、国家林业局引进国际先进技术项目(2003-4-43)、科技部社会公益研究专项(2004D B3J102)和国家林业局森林生态环境重点实验室联合资助

作者简介: 何常清(1981—),男,河北易县人,硕士生,主要从事森林生态方面的研究。

*通讯作者: 于澎涛, Tel: 010-62889562; E-mail: yupt@forestry.ac.cn

of n evidently increased with the litter coverage; while the litter coverage carries in the range of 10.0 to $25.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, the value of n increased more and more slower And there was a satisfied binomial relationship between n and litter coverage

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; litter coverage; surface runoff; velocity of flow; Manning resistant coefficient

地表径流的流速及流量都是土壤侵蚀的主要动力,但流速的影响更大,泥沙的可移动量与流速的 6 次方成正比^[1],流速的微小变化即可引起径流挟带泥沙能力的很大变化^[2]。林地的枯落物覆盖具有积极而重要的森林水文作用,森林枯落物覆盖地表能够直接增大地表粗糙程度(通常用曼宁公式中的糙率系数 n 值表示)^[3],增加地表径流的阻力系数^[4-6],降低坡面径流的流速,延缓径流产生,减小径流冲刷土壤的能力^[7-9]。华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 是宁夏六盘山地区的主要造林树种,目前多为 18~25 年生的人工林。随着森林植被的加快恢复,华北落叶松林的面积还在快速增加,对坡面水文过程、坡面土壤侵蚀、区域水文特征的影响越来越大,因此,系统研究华北落叶松枯落物的阻流效应非常重要。

1 试验小流域和样地概况

本试验于 2005 年 7 月完成。试验点位于宁夏六盘山北坡的叠叠沟小流域,隶属宁夏回族自治区固原市原州区叠叠沟林场,海拔 1 975~2 615 m,年均气温 6℃,年均降水量 480 mm,7—9 月份降雨占全年降水量的 62%,属温带半干旱气候。试验样地位于叠叠沟小流域下游 (35°38'209"N, 106°08'766"E),海拔高度 1 993 m,坡向为北偏东 85°,坡位为下坡,坡度 14°,土层厚 20 cm,属于坡积母质。试验前将样地内草皮铲掉,露出表层土壤,以备铺设不同厚度的枯落物。样地各层土壤的物理性质见表 1。

表 1 试验样地各层的土壤物理性质

土壤层次 / cm	土壤密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	总孔隙度 / %	毛管孔隙度 / %	非毛管孔隙度 / %	>2 mm 石砾含量 / $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	>2 mm 石砾体积含量 / %
0~5	0.84	64.41	61.46	2.95	54.7	1.3
5~10	0.92	62.41	61.27	1.14	51.7	1.5
10~20	1.10	62.71	60.61	2.10	379.5	13.8

2 试验方法及试验设计

2.1 试验装置

沿山坡方向用钢板做成高 0.1 m、长 0.9 m、宽

0.5 m 的径流小区,钢板打入土壤 0.2 m 左右。在径流小区上端设一进水槽,进水槽上方布设一个稳压水槽并与供水水桶连接,确保小区内形成稳压恒定水流。在径流小区下端装上集水槽板^[10],试验装置见图 1。

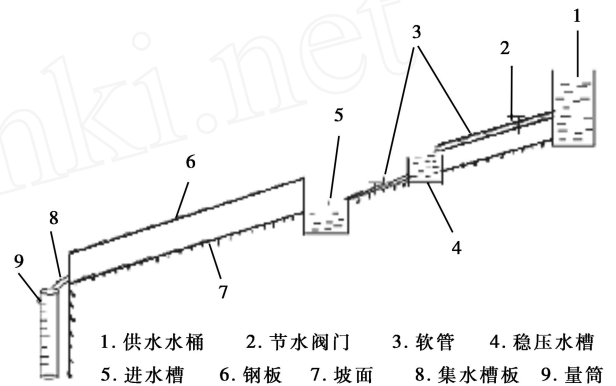


图 1 径流小区剖面图

打开供水水桶和稳压水槽的节水阀门,水流通过胶管导入进水槽,水流以溢流的形式从进水槽向试验小区供水,开始计时。集水槽内出水后,定时量测出水量,间隔时间段长为 10 s。当集水槽的单位时间出水量即流量的连续 3 次测定值的差值 2% 时,即视为出水稳定。

在出水稳定以后,采用染色法测定流速。测定流速时同时测定该时段内集水槽的出流量。

2.2 试验设计

将收集到的 2004 年凋落的半分解的华北落叶松枯落物 80 g 烘干称干质量,然后按照试验设计均匀铺在铲掉草皮的试验样地的土壤表面。共设计了 10 个覆盖量梯度,即 0.0、0.5、1.0、3.0、5.0、7.0、10.0、15.0、20.0、25.0 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在枯落物覆盖量为 25.0 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,枯落物层厚度为 7 cm。对每个覆盖量处理都进行了入口流量为 10、20、30、40、60 $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水流试验。

3 结果与分析

3.1 枯落物覆盖量对地表径流流速的影响

从图 2 看出,在入口流量分别为 10、20、30、40、60 $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,地表径流流速都随枯落物覆

盖量的增加而明显减小,但当覆盖量增加到 $10.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后,减小的趋势逐渐变缓;在增加到 $15.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后,减小的趋势基本停止。在枯落物覆盖量从 0.0 增加到 $25.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,地表径流流速分别从 $4.0, 6.2, 8.2, 9.5, 11.9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小到 $1.7, 2.4, 2.8, 2.9, 3.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,对应分别减小了 57.50% 、 61.29% 、 65.85% 、 69.47% 、 72.27% ,这是因为随着枯落物覆盖量的增加,地表径流的阻力和路径加大,使水流流速变小。

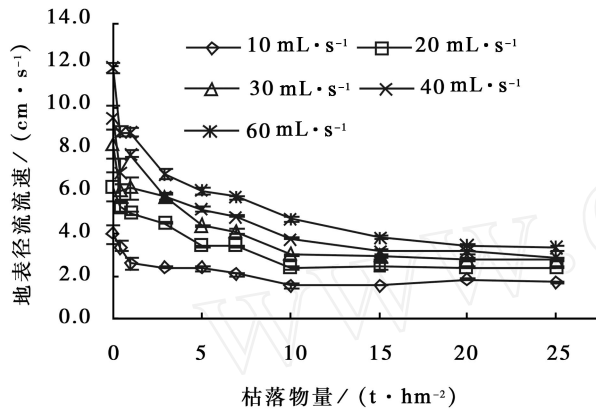


图 2 入口流量一定时枯落物量与地表径流的关系

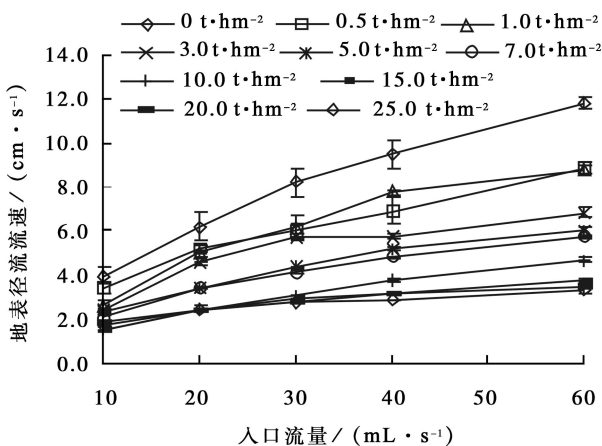


图 3 枯落物覆盖量一定时入口流量对地表径流流速的影响

图 3 表明,在枯落物覆盖量为 $0.0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,地表径流流速均随入口流量的增加而明显加大。在入口流量由 $10 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $60 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,10个不同覆盖量处理的流速分别从 $3.9, 3.4, 2.6, 2.4, 2.3, 2.1, 1.5, 1.5, 1.9, 1.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $11.9, 8.9, 8.8, 6.8, 6.0, 5.7, 4.7, 3.8, 3.5, 3.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,约增加了 $1.0 \sim 2.4$ 倍。与枯落物覆盖处理相比,无枯落物覆盖时流速增幅很大,而有枯落物覆盖时径流流

速增幅一般较小,这表明枯落物覆盖在一定范围内降低径流流速的作用随进水流量加大而增强。

3.2 枯落物覆盖对地表径流流速的阻延作用

枯落物覆盖对地表径流流速的阻延值 V 为:

$$V = V_0 - V \quad (1)$$

式(1)中: V_0 —无枯落物覆盖时的地表径流流速 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); V —有枯落物覆盖时的地表径流流速 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。由公式(1)计算的华北落叶松枯落物覆盖对地表径流流速的阻延作用值见表 2。

表 2 不同枯落物覆盖量(干质量)时的地表

入口流量 / ($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$)	径流流速的阻延值 V $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$								
	枯落物覆盖量 / ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)								
	0.5	1.0	3.0	5.0	7.0	10.0	15.0	20.0	25.0
10	0.6	1.4	1.5	1.6	1.9	2.4	2.4	2.1	2.3
20	0.9	1.2	1.6	2.7	2.8	3.8	3.7	3.7	3.7
30	2.2	2.0	2.5	3.8	4.0	5.2	5.2	5.4	5.4
40	2.6	1.7	3.7	4.3	4.7	5.7	6.3	6.3	6.6
60	3.0	3.1	5.0	5.8	6.1	7.2	8.1	8.4	8.6

有关描述坡面径流流速的公式^[2]基本形式为:

$$V = k i^a q^b \quad (2)$$

式(2)中: V —坡面径流流速 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); i —比降; q —单宽流量 ($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$); k, a, b 为常数。

假设流速阻延值 V 与 i 和 q 存在着与式(2)相似形式的关系,为了定量研究枯落物覆盖量 G 对 V 的影响,在式(2)中增加了 G^c 项,则有枯落物覆盖情况下的坡面径流流速公式:

$$V = K i^a q^b (1 - G^c) \quad (3)$$

$$V = V_0 - V = K i^a q^b G^c \quad (4)$$

由于本试验是在野外固定样地进行,坡度没有变化,故可将 i 项看作常数,公式(4)变为:

$$V = K q^a G^b \quad (5)$$

将试验取得的枯落物覆盖的地表径流流速阻延值、单宽流量、枯落物覆盖量等数值进行式(5)的回归分析,得:

$$V = 3.6177 q^{0.5075} G^{0.4315} \quad R^2 = 0.9102 \quad (6)$$

偏相关系数分别为 $R_{Vq} = 0.4073^{**}$, $R_{VG} = 0.5652^{**}$ 。从回归分析结果来看,地表径流流速的阻延值与单宽流量、枯落物覆盖量都呈极显著的正相关关系。

3.3 枯落物覆盖量对曼宁阻力系数的影响

森林地被物覆盖对地表径流流速的影响程度可由曼宁阻力系数 n 值予以量化表示^[1],即利用 n 值的大小反映枯落物覆盖量增加地表粗糙程度的作用。

经典的曼宁公式为 $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, 其中的曼宁阻力系数 n 计算公式如下:

$$n = q^{-1} h^{5/3} i^{1/2} \quad (7)$$

式 (7) 中: q 为单宽流量 ($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), $q = Q/B$; Q = (小区上端进流量 + 小区下端出流量) / 2 ($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$); B 为径流小区宽度 (50 cm); h 为水深, 当过水断面为宽浅式矩形时, 其水力半径 R 约等于水深 h , $h = \frac{Q}{B} = \frac{Qt}{B}$; 为过水断面面积 (cm^2); l 为小区长度 (90 cm); t 为染色剂流过试验小区的时间 (s); i 为比降, $i = \sin \theta$; θ 为小区坡度 ($^\circ$).

从图 4 看出, 枯落物覆盖量为 $0 \sim 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 入口流量为 $10, 20, 30, 40, 60 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下, 曼宁阻力系数随枯落物量增加急剧增大, 由裸地的 $0.0120, 0.0095, 0.0081, 0.0082, 0.0077$ 增加到

枯落物覆盖量为 $10.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的 $0.0578, 0.0440, 0.0400, 0.0344, 0.0326$, 分别增加了 $3.81, 3.63, 3.95, 3.22, 3.25$ 倍。在枯落物量由 $10.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $25.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 且入口流量为 $10, 20 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 的曼宁阻力系数不再增大, 入口流量 $30, 40, 60 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 n 值增大趋势逐渐变缓。从以上分析可以看出, 对于入口流量 $10, 20 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 而言, 枯落物量 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为增大曼宁阻力系数的上限值, 而试验的枯落物覆盖量还没有达到入口流量 $40, 60 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的上限值。试验中的坡面水流为薄层水流, 理论上说, 枯落物干质量增加, 枯落物紧实度加大, 通过加强枯落物与地面的接触使枯落物的阻水作用提高, 枯落物覆盖量增加而导致曼宁阻力系数 n 值增加应仅在一定的枯落物厚度范围内存在。

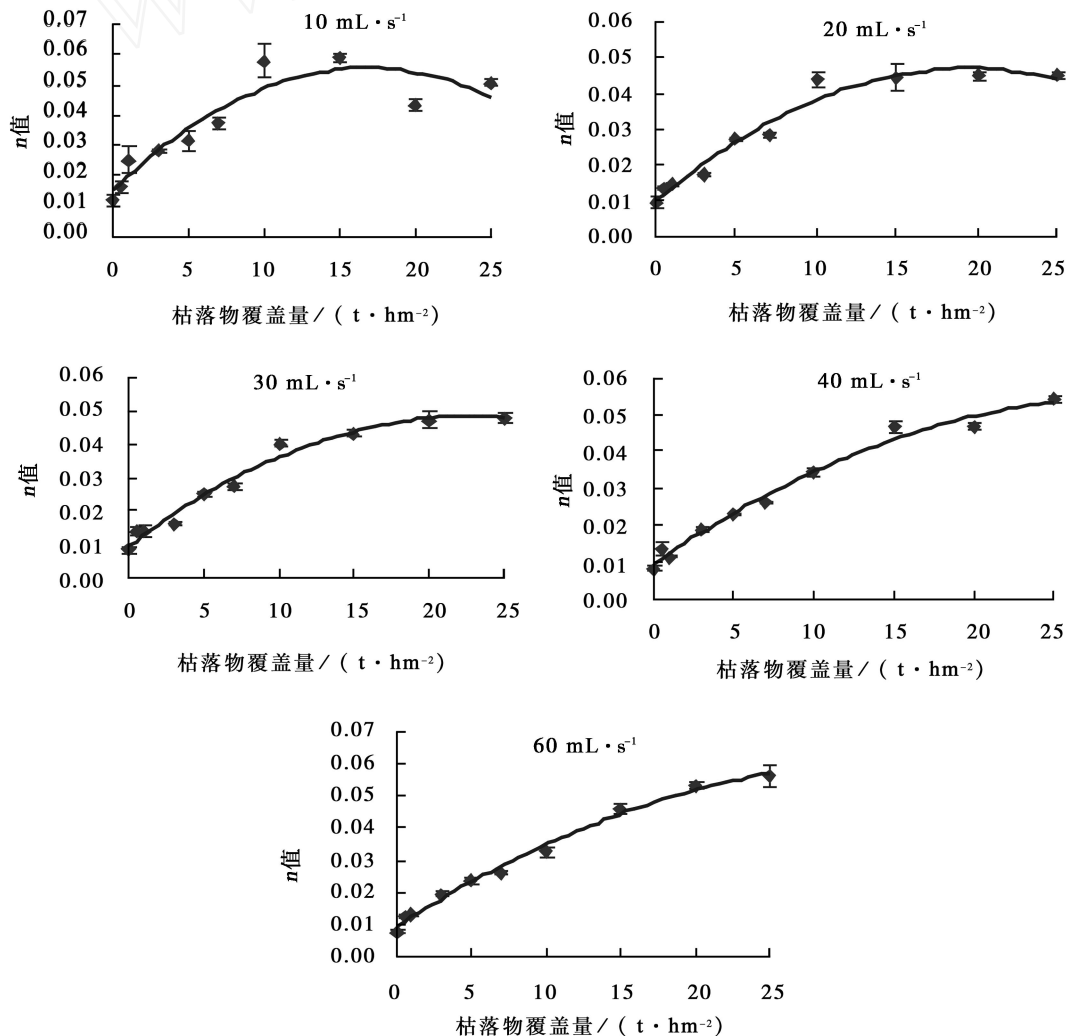


图 4 不同入口流量条件下枯落物覆盖量与曼宁阻力系数 (n) 的二项式关系

曼宁阻力系数 n 值与枯落物覆盖量 G 呈正相关,其关系式有 $n = aG^b$ 或 $n = a_1G^3 + a_2G^2 + a_3G + b$ 两种形式^[3,11]。由表 3 可以看出,对于本试验结果

而言,二项式关系和三项式关系比幂函数关系好,但二项式和三项式的相关系数比较接近,为利用简便,故认为二项式关系较好。

表 3 不同入口流量条件下曼宁阻力系数 (n) 值与枯落物覆盖量 (G) 的关系比较

入口流量 / ($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$)	拟合公式					
	幂函数	R^2	二项式	R^2	三项式	R^2
10	$n = 0.0092G^{0.5178} + 0.0120$	0.8526	$n = -1E-04G^2 + 0.0048G + 0.0149$	0.8696	$n = 4E-06G^3 - 0.0003G^2 + 0.0061G + 0.0314$	0.8792
20	$n = 0.0054G^{0.6509} + 0.0095$	0.9441	$n = -1E-04G^2 + 0.0038G + 0.0098$	0.9658	$n = 4E-07G^3 - 0.0001G^2 + 0.0032G + 0.0096$	0.9659
30	$n = 0.0064G^{0.5874} + 0.0081$	0.9279	$n = -8E-05G^2 + 0.0034G + 0.0094$	0.9800	$n = -6E-07G^3 - 5E-05G^2 + 0.0032G + 0.0096$	0.9802
40	$n = 0.0054G^{0.6583} + 0.0082$	0.9267	$n = -5E-05G^2 + 0.003G + 0.0095$	0.9856	$n = -1E-07G^3 - 5E-05G^2 + 0.003G + 0.0095$	0.9856
60	$n = 0.006G^{0.6432} + 0.0077$	0.9830	$n = -4E-05G^2 + 0.0029G + 0.0095$	0.9918	$n = -1E-07G^3 - 5E-05G^2 + 0.003G + 0.0095$	0.9856

4 结论与讨论

(1)坡面地表径流流速随枯落物覆盖量的增加而明显减小。在入口流量为 10、20、30、40、60 $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 的试验条件下,枯落物覆盖量从 0.0 增加到 25.0 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,地表径流流速减小的幅度为 57.50% ~ 72.27%,减小作用随进流流量的增加而加大。枯落物层覆盖能大大减小地表径流的流速。

(2)在坡度为 14 的条件下,华北落叶松枯落物覆盖的地表径流流速阻延值 $V (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ 与单宽流量 $q (\text{mL} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$ 、覆盖量 $G (\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$ 之间的关系为 $V = 3.6177q^{0.5075}G^{0.4315} (R^2 = 0.9102)$ 。地表径流流速阻延值与单宽流量、枯落物覆盖量都呈极显著的正相关关系。

(3)增加华北落叶松枯落物覆盖量能加大地表曼宁阻力系数 n 值。覆盖量小于 10.0 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, n 值随覆盖量急剧增加,由裸地的 0.0120、0.0095、0.0081、0.0082、0.0077 分别增加到 0.0578、0.0440、0.0400、0.0344、0.0326;在枯落物覆盖量大于 10.0 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,入口流量 10、20 $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的曼宁阻力系数不再增大,入口流量为 30、40、60 $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的 n 值增大趋势逐渐变缓。

(4)曼宁阻力系数 n 值与枯落物覆盖量 G 的关系可以是幂函数、二项式、三项式等形式,使用二项式关系较好。

参考文献:

- [1] 张洪江,北原曜,远藤泰造. 晋西不同林地状况对糙率系数 n 值影响的研究 [J]. 水土保持通报, 1995, 15 (2): 10 ~ 21
- [2] 陈奇伯,张洪江,解明曙. 森林枯落物及其苔藓层阻延径流速度研究 [J]. 北京林业大学学报, 1996, 18 (1): 1 ~ 5
- [3] 张洪江,北原曜,远藤泰造. 几种林木枯落物对糙率系数 n 值的影响 [J]. 水土保持学报, 1994, 8 (4): 4 ~ 10
- [4] Dunkerley D L. Surface tension and friction coefficients in shallow, laminar overland flows through organic litter [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002a (27): 45 ~ 58
- [5] Dunkerley D L. Volumetric displacement of flow depth by obstacles, and the determination of friction in shallow overland flows [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002b (27): 165 ~ 175
- [6] Dunkerley D L, Domelow P, Tooth D. Frictional retardation of laminar flow by plant litter and surface stones on dry land surfaces: a laboratory study [J]. Water Resources Research, 2001 (37): 1417 ~ 1424
- [7] 张洪江,北原曜. 晋西不同林地状况下糙率系数及其对土壤侵蚀量的影响 [J]. 人民黄河, 1995, 3 (3): 29 ~ 31
- [8] 赵鸿雁,吴钦孝,刘向东. 山杨枯枝落叶层的水文水保作用研究 [J]. 林业科学, 1994, 30 (2): 176 ~ 180
- [9] 高志勤,傅懋毅. 毛竹林等不同森林类型枯落物水文特性的研究 [J]. 林业科学研究, 2005, 18 (3): 274 ~ 279
- [10] 杨海龙. 三峡库区小流域森林植被水文调洪规律的研究 [D]. 北京:北京林业大学, 2004
- [11] Qin Y S, Yu X X, Wang S Y. Water Interception and Retarding Characteristics of Forest Litters in the Upper Streams of Miyun Reservoir, Beijing [J]. Forestry Studies in China, 2000, 2 (1): 58 ~ 62