

马尾松林地不同枯落物覆盖下土壤入渗特征

朱方方^{1,2}, 程金花^{1,2}, 郑雪慧^{1,2}, 姚成慧^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.国家林业局水土保持与荒漠化防治重点实验室,北京 100083)

摘要:采用室内人工降雨模拟试验,在径流小区尺度上观测坡面产流过程,并用 WatchDog1400 土壤水分自动监测站观测土壤体积含水率变化过程,研究枯落物覆盖下坡面水分入渗特征。结果表明:(1)土壤入渗滞后时间随着枯落物覆盖量的增加而增大,在坡度上体现为 $10^\circ > 5^\circ$;(2)土壤入渗率随雨强、枯落物覆盖量增加而增大,随坡度增大而减小;土壤储水量随覆盖量增加先增大后减小,在雨强方面体现为 $120 \text{ mm/h} > 60 \text{ mm/h}$;(3)逐步回归结果表明,土壤入渗滞后时间、入渗率和储水量与枯落物覆盖量呈线性关系,滞后时间、入渗率与枯落物覆盖量呈一次函数正相关关系,储水量与覆盖量呈二次函数关系。研究结果可为低效林枯落物水源涵养功能研究提供依据。

关键词: 枯落物; 入渗特征; 函数关系; 土壤含水率

中图分类号:S715.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0085-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.013

Soil Infiltration Characteristics Under Different Litter Covers in *Pinus massoniana* Forest

ZHU Fangfang^{1,2}, CHENG Jinhua^{1,2}, ZHENG Xuehui^{1,2}, YAO Chenghui^{1,2}

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control of State Forestry Administration, Beijing 100083)

Abstract: Using laboratory artificial simulation rainfall experiment, the runoff process was observed on the scale of runoff plot, and the change process of soil volume moisture content was observed with Watchdog 1400 soil moisture automatic monitoring station to study the water infiltration characteristics of the slope under litter cover. The results were as follows:(1) The lag time of soil infiltration increases with the increase of litter coverage, and the slope was $10^\circ > 5^\circ$; (2) The infiltration rate of soil increases with the increase of rainfall intensity and litter coverage, and decreases with the increase of slope; the soil water storage first increases and then decreases with the increase of coverage, and the rainfall intensity is $120 \text{ mm/h} > 60 \text{ mm/h}$; (3) Stepwise regression shows that the soil infiltration lag time, infiltration rate and water storage capacity are linearly related to the amount of litter coverage, the lag time, infiltration rate and litter coverage are positively correlated with each other, the water storage and coverage has a quadratic function. The results can provide a basis for the research on the water source conservation function of the low-efficiency forest litter of *Pinus massoniana*.

Keywords: litter; infiltration characteristics; function relation; soil water content

土壤水分入渗是指经由地表截留后的水分在重力势等作用下运移、储存为土壤水的动态过程^[1]。根据水量平衡理论,地表水分截留对土壤入渗的影响显著。大量研究^[2-4]表明,枯落物层作为森林水文效应的重要活动层,对降雨截留、增加土壤入渗起着重要作用。土壤水分入渗的改良方式主要分为 3 种:地表覆盖^[5-6]、添加土壤改良剂^[7-8]和改进耕作管理措施^[9-10]。其中,地表覆盖可分为物理覆盖措施和植物覆盖措施,原理都是在土壤表层形成不透气层,对降

雨入渗起到缓冲和储存的作用,同时提高土壤水分横向运移的能力,达到减少土壤水分蒸散、提高土壤含水量的作用^[11-12]。目前,土壤入渗的研究^[13-15]多集中于干旱缺水的西北地区,对南方林地土壤入渗特征的研究较少,方法单一。陈佩岩等^[3]通过野外人工模拟降雨试验研究晋西黄土区油松林及刺槐林林地不同枯落物覆盖密度对各土层含水率的影响发现,林地上层土壤(0—60 cm)的含水率随覆盖密度增加而逐渐减小;侯贵荣等^[4]通过野外观测对比北京山区栓皮

收稿日期:2019-11-21

资助项目:国家重点基础研究发展计划项目(2017YFC0505500,2017YFC0505501)

第一作者:朱方方(1993—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:Fangf0506@163.com

通信作者:程金花(1979—),女,博士,教授,主要从事水土保持研究。E-mail:jinhua_cheng@126.com

栎林地和油松林地土壤蓄水量差异发现,栓皮栎和油松林地 0—40 cm 土层土壤储水量的增加率随雨强增加而降低;曹云生等^[16]采用室内浸泡法和双环刀法对比冀北山地不同灌木林分枯落物层水源涵养能力发现,各林分初渗速率与稳渗速率大小排序一致,即荆条>三裂绣线菊>胡枝子;阿茹·苏里坦等^[17]采用环刀法对天山雪岭云杉森林不同群落土壤水分入渗特性进行研究发现,土壤入渗性能均具有初渗速率>平均入渗速率>稳定入渗速率的相同趋势。本文采用人工模拟降雨试验,运用 WatchDog1400 土壤水分自动监测站观测各土层土壤含水率变化过程,通过对比降雨过程中坡面产流量与各层土壤含水率的变化,研究马尾松林地枯落物对土壤入渗的影响,量化枯落物覆盖量与土壤水分入渗特征参数的关系,以期为南方地区低效防护林生态服务功能提升提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

湖北太子山林场位于我国南北过渡地带,海拔 403.0~467.4 m,属于亚热带季风湿润性气候区,有明显的喀斯特地貌。现经营总面积 7 576 hm²,森林覆盖率为 82.0%,植被主要为马尾松、杉木及多种阔叶树种。雨水集中于夏季,年平均降水量 1 094.6 mm,年平均气温 16.4 °C。土壤主要为黏性黄棕壤,黄土母质,pH 为 5.5~6.5,呈微酸性。

1.2 试验设计

人工模拟降雨试验于 2019 年 6—7 月在北京林业大学鹫峰实验林场首都圈森林生态站降雨大厅进行,人工模拟降雨采用 QYJY-503C 固定式人工降雨设备,其喷头装置高度为 12 m,降雨均匀度>85%,强度可控制在 10~300 mm/h,相对误差<1%。

根据太子山地区林地调查情况和多年气象数据分析,马尾松林地坡度在 5°~12°,枯落物覆盖量为 0~400 g/m²,土层厚度为 25—50 cm,当雨强>60 mm/h 时,坡面产生细小沟道。因此,将马尾松枯落物覆盖量设置为 0,100,200,400 g/m² 4 个处理,编号分别为 N1、N2、N3 和 N4。覆盖度 100%。坡度为 5°,10°,雨强选择 60,120 mm/h,每个处理 2 个重复。每场试验时长为坡面产流后 1 h,综合以上 3 种因素,共计 32 场降雨。

1.3 试验方法

野外土样采集工作于 2019 年 6 月开展,为减小误差,选择林场内 2 个小流域的马尾松林地进行分层(10 cm/层,共 4 层)取样,并测定土壤容重与含水率,将土样晾干、粉碎,过 2 mm 筛,去除杂草和石块,土槽底部为 0.1 m 细沙层,为保证水分均匀下渗,在细沙层上面铺 1 层纱布,根据采样时每层土壤的容

重与含水率进行土槽(长 2 m×宽 0.5 m×高 0.5 m)分层填充,同时喷洒水分。将 WatchDog1400 土壤水分自动监测站的 4 个探头分别插入 4 个土层中(每 10 cm 为 1 层),记录数据时间间隔为 1 min。当土壤各层含水率与野外情况基本一致(误差 10%以内)时,进行模拟降雨试验,坡面径流取样时间间隔前 10 min 为 2 min/次,后 50 min 为 10 min/次。为保证试验数据准确,每个土槽晾晒 3 天后再进行下一场降雨试验。

1.4 参数计算与数据处理

稳渗时间是土壤渗透性能评价的重要参数之一^[17],通过土壤水分自助监测站测得土壤体积含水率实时动态,用土壤体积含水率变化曲线的斜率 K 值可以表征初始入渗率, $K=0$ 时对应的 X 轴坐标值为土壤体积含水量实际稳定时间 T_1 。同时根据公式(1)可以推算出土壤实时入渗率,将 3 个差值最小的数值所对应的时间定为土壤体积含水量稳定时间 T_2 。

$$I = P - \frac{10M_r}{St \cos \omega} \quad (1)$$

式中: I 为土壤入渗率(mm/min); P 为降雨强度(mm/min); M_r 为径流量(mL); S 为土槽面积(cm²); ω 为坡度(°)。

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (2)$$

式中: ΔT 为入渗滞后时间(min); T_1 为土壤体积含水量实际稳定时间(min); T_2 为土壤体积含水量稳定时间(min)。

$$S = \sum_{i=1}^4 \theta_i \cdot h_i \quad (3)$$

式中: S 为土壤蓄水量(mm); θ_i 为第 i 层土壤体积含水量(cm³/cm³); h_i 为第 i 层土层厚度(mm)。

$$K = \frac{\theta_m - \theta_n}{m - n} \quad (4)$$

式中: K 为土壤体积含水率单位时间变化斜率,无量纲; θ_m 、 θ_n 为时间 m 、 n 时土壤体积含水率(cm³/cm³)。

采用 Sigmaplot 12.5 和 Excel 2012 软件对原始数据进行记录、统计、分析及制图,利用数理统计学中皮尔逊相关系数 r 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 枯落物覆盖量对水分入渗滞后时间的影响

坡面径流量与土壤含水率对枯落物覆盖下水分运移的响应存在时差,其差值可表示为土壤水分入渗滞后时间,用以评价枯落物截留性能强弱。

由表 1 可以看出,在雨强、坡度和覆盖量 3 种因素影响下,不同处理坡面的稳渗时间和滞后时间均具有极显著差异($p < 0.001$)。对所有处理而言,在雨强、坡度相同时, T_1 、 T_2 和滞后时间随着枯落物覆盖

量的增加而增加;雨强相同时,将不同坡度下覆盖量相同的坡面进行比较发现,10°坡面土壤入渗滞后时间大于 5°坡面;坡度相同时,相同处理坡面上土壤入渗滞后时间为 60 mm/h < 120 mm/h。将雨强、坡度、覆盖量分别与滞后时间进行相关性分析发现,坡度与滞后时间相关性极显著($p < 0.001$)。枯落物对土壤入渗的影响主要通过 2 个途径:一是通过拦截降雨,减少坡面径流,增大土壤入渗水源量^[18];二是枯落物层降低降雨动能,降低水分入渗速度,增加水分入渗反应时间^[3]。降雨雨滴先经历枯落物截留阶段,雨滴经过枯落物层的实际路径长度为坡面枯落物层厚度与坡面角度余弦值的比值,坡度越大,余弦值越小, L 值越大。同时根据能量公式($E = \frac{1}{2}mv^2$)可知,此过程会降低雨滴动能,增大入渗阻力,直接影响土壤入渗参数。因此,土壤入渗滞后时间为 10° > 5°。

表 1 不同坡面处理下土壤入渗滞后时间

处理	实际稳渗时间	稳渗时间	滞后时间
	T_1/min	T_2/min	$\Delta t/\text{min}$
5°N1-60 mm/h	27.5	22.5	5.0
5°N2-60 mm/h	37.0	27.5	9.5
5°N3-60 mm/h	40.0	27.5	12.5
5°N4-60 mm/h	47.5	32.5	15.0
10°N1-60 mm/h	37.5	22.5	15.0
10°N2-60 mm/h	37.5	15.5	22.0
10°N3-60 mm/h	42.5	15.5	27.0
10°N4-60 mm/h	42.5	15.5	27.0
5°N1-120 mm/h	37.5	32.5	5.0
5°N2-120 mm/h	42.5	32.5	10.0
5°N3-120 mm/h	47.5	37.5	10.0
5°N4-120 mm/h	57.5	42.5	15.0
10°N1-120 mm/h	32.5	22.5	10.0
10°N2-120 mm/h	37.5	22.5	15.0
10°N3-120 mm/h	47.5	27.5	20.0
10°N4-120 mm/h	50.0	27.5	22.5

2.2 枯落物覆盖量对入渗率的影响

初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率是土壤水分入渗的 3 个重要特征指标^[19],通过入渗速率值表达土壤水分入渗特性具有直观性。本文采用体积含水率变化曲线的斜率 K 值变化表征初始入渗率,便于研究各土层初始入渗率对不同坡面处理的响应;同时,将每场降雨中由公式 1 所得的第 1 个 I 值定义为土壤整体初始入渗率。

从图 1 可以看出,通过分析各土层 K 值与雨强、坡度 3 种因素的相关性分析可知,3 种因素对 K 值的变化均有影响。在每场降雨过程中, K 值随着土层深度增加呈现出先增加后减小的趋势,在 10—20 cm 土层达到最大值; K 值变化范围随着土层深度的增加而变小。随着降雨时间的增加,表层疏松土壤被径流冲刷,渗透率逐渐稳定,这与李波等^[20]的研究结果相一致。土壤含水率

随土层深度增加呈现先降低后增加的趋势,与 K 值变化趋势相反,这与张敬晓^[14]的研究结果基本一致。土壤初始含水率低的土层由于土壤较为干燥,水势梯度较大,水分在重力势和基质势共同作用下迅速下渗,单位时间内含水率变化较大,因此初始入渗率较大。深层土壤受空气温度及人类活动影响较小,土壤体积含水率较高,对雨强、坡面处理等因素的响应不明显,这与陈佩岩等^[3]的研究结果基本一致。枯落物覆盖下坡面 K 值大于裸地,但随着枯落物覆盖量增加,各土层 K 值变化并不规律。枯落物层在坡面形成“储水区”,在垂直方向对降雨雨滴进行截留,在水平方向对坡面水流进行阻滞,通过增加土壤入渗“供给量”和“供水时长”提高土壤入渗率。

从表 2 可以看出,土壤初始入渗率、稳定入渗率与平均入渗率均随枯落物覆盖量的增加而增大。雨强、坡度对土壤初始入渗率均有显著影响,入渗率随着降雨强度的增加而增大,随着坡度的增加而减小。降雨强度为 60 mm/h 时,5°和 10°不同枯落物覆盖量下坡面初始入渗率较裸地分别提高 11%~16%和 150%~270%,稳定入渗率分别提高 26%~62%和 750%~1 580%,平均入渗率分别提高 22%~45%和 381%~878%,2 个坡度的土壤入渗率均具有显著性差异($p < 0.05$);降雨强度为 120 mm/h 时,不同枯落物覆盖量下 5°和 10°坡面初始入渗率较裸地分别提高 10%~23%和 5%~15%,稳定入渗率分别提高 27%~42%和 260%~1220%,平均入渗率分别提高 22%~38%和 13%~95%,2 个坡度土壤入渗参数不存在显著性差异($p > 0.05$)。坡度相同时,2 种雨强下的土壤入渗率均具有极显著差异($p < 0.01$)。枯落物覆盖量增加导致坡面流流速降低,坡面糙度大,增加土壤水分入渗,这与李兆松等^[21]的研究结果基本一致。枯落物层具有保水保墒作用,枯落物覆盖量越大,土壤表层与大气进行温度交换介质层越厚,水分蒸发程度越低,土壤入渗率越高^[22]。降雨初期,枯落物处于干燥状态,持水能力较强,覆盖量的增加可以增大土壤入渗水分“供给量”,提高土壤初始入渗率。入渗界面土壤随着降雨历时增加而紧实,土壤孔隙度减小,入渗率迅速减小并趋于稳定。雨强增大,一方面直接增加土壤入渗水分来源;另一方面,会增大雨滴初始动能,导致初始入渗率增加。当雨强增大 1 倍时,坡度变化对于降雨入渗初始速率的影响不显著。

2.3 土壤储水量对枯落物覆盖量的响应

土壤储水量是植被根系发育的主要影响因素,对植物生长起到关键作用。从图 2 可以看出,各层土壤储水量变化均表现为随着枯落物覆盖量增加先增大后减小,储水量峰值出现在 10—30 cm 次表土层,且裸坡土壤储

水量最小。随着土层深度增加,土壤储水量呈现先增后减的趋势,这与侯贵荣等^[4]的研究结果一致。土壤表层为水分运动活跃层,土壤容重小,大孔隙多,由于受大气

温度影响大,水分蒸散量大,土壤储水量小;次表土层含水率变化(K 值)大,雨水供给量大于蒸散量,土壤储水量最大;深层土壤含水率高,储水量小。

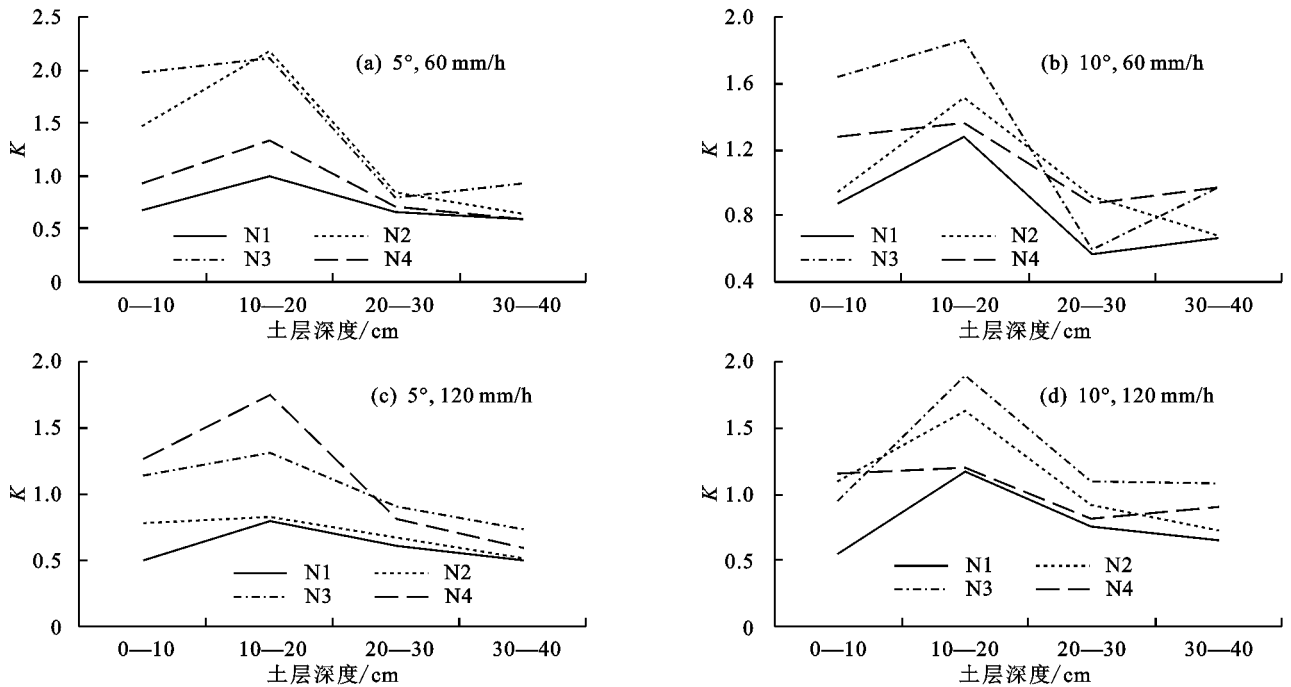


图 1 K 值对不同坡面处理的响应

表 2 不同坡面处理下土壤入渗特征

坡度/ $^{\circ}$	土壤入渗率	60 mm/h				120 mm/h			
		N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
5	初始入渗率	0.754	0.843	0.880	0.894	1.528	1.681	1.849	1.885
	稳定入渗率	0.498	0.630	0.676	0.809	1.183	1.506	1.614	1.689
	平均入渗率	0.559	0.683	0.712	0.814	1.233	1.508	1.629	1.705
10	初始入渗率	0.204	0.522	0.535	0.762	1.518	1.626	1.749	1.781
	稳定入渗率	0.036	0.303	0.401	0.597	0.071	0.257	0.257	0.935
	平均入渗率	0.065	0.315	0.401	0.639	0.442	0.515	0.664	1.061

整体土壤储水量对不同坡面处理的响应见图 3。土壤储水量随枯落物覆盖量增加呈先增大后减小的趋势,峰值出现在覆盖量为 100 g/m^2 时。当雨强为 120 mm/h 时,植被覆盖量对储水量影响不显著 ($p > 0.05$),土壤储水量与雨强呈显著正相关关系 ($p < 0.01$),这与付玉娟等^[23]研究结果基本一致。枯落物层对降雨雨滴动能的消减能力随着雨强的增大而逐渐降低^[24],表明枯落物层在雨强较大时截留作用会减弱。根据水量平衡原则,在不考虑蒸散量的前提下,枯落物层截留的水分一部分被枯落物吸收,一部分进入土壤。枯落物覆盖量对储水量的影响主要体现在 2 个方面:一是枯落物层持水作用,枯落物层可以储存水分,增加土壤入渗水源;二是枯落物层降低雨滴动能,导致入渗水分动能减小,降低土壤储水量。由此可知,枯落物持水量为枯落物层正负作用下的产物,当枯落物截留量与持水量差值减小,土壤入渗水量减少,土壤储水量降低。

2.4 枯落物覆盖量与入渗参数的量化关系

从图 4 和表 3 可以看出,将滞后时间、土壤入渗率、土壤储水量等入渗特征参数与枯落物覆盖量之间的关系进行量化发现,存在显著的线性关系 ($0.546 \leq R^2 \leq 0.957$)。滞后时间、入渗率与枯落物覆盖量呈正相关关系,均随着枯落物覆盖量增加而增大;入渗量与枯落物覆盖量呈负相关关系,随着枯落物覆盖量增加而减少。坡度、雨强不同,入渗参数对枯落物覆盖量的关系也不同。

3 讨论

枯枝落叶层是重要的水文作用层,其蓄积量受林分密度、分解速度等多种因素影响。南方马尾松林地枯落物层较厚,且难以分解,对降雨、入渗、产流等水分运移存在影响;同时对坡面产流和土壤各层水分变化进行分析后发现,枯落物层对入渗的影响主要体现在垂直方向上对降雨拦截、在水平方向上对坡面流阻滞。雨滴动能减小会导致雨滴无法穿越枯落物层,增加入渗水源量,同时降低土壤储水量;当坡面流形成

后,由于枯落物层附着于地面上,对坡面流具有阻滞

作用,且减少水分蒸发散,增加入渗。

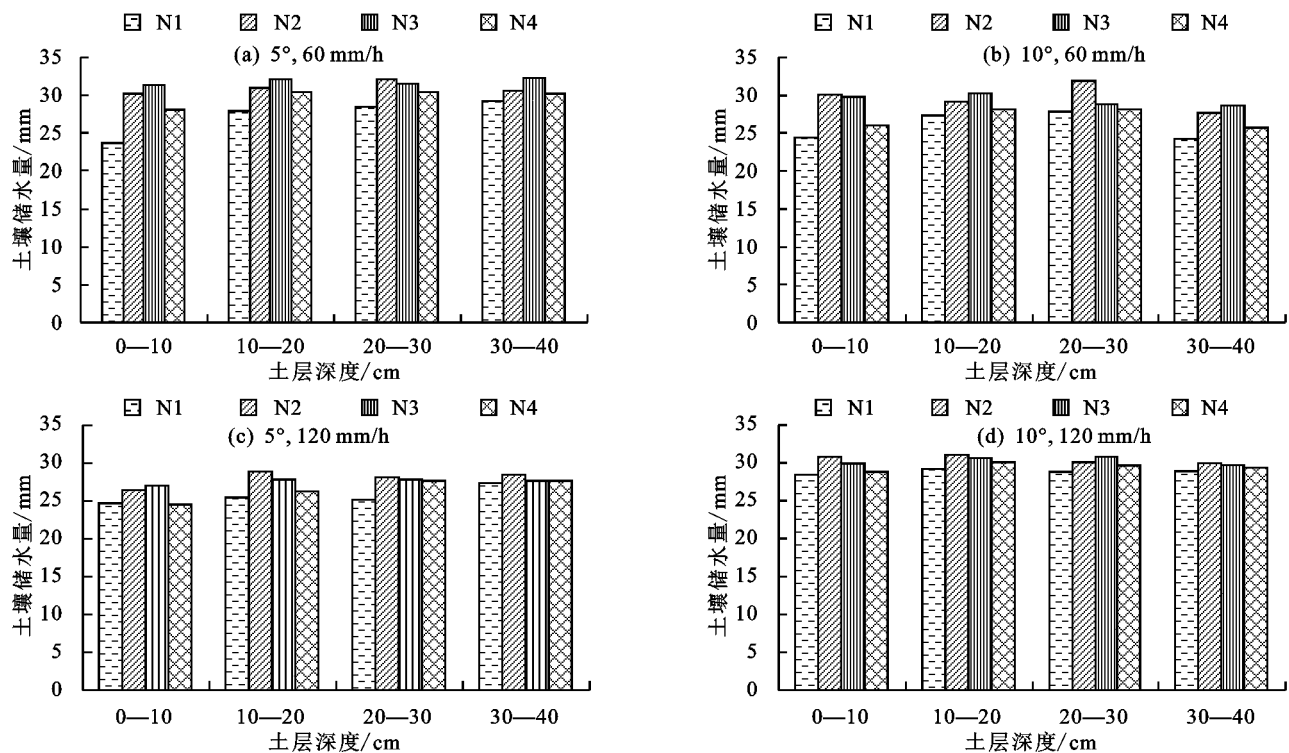


图 2 不同坡面处理下各土层土壤储水量变化

表 3 土壤入渗特征参数与枯落物覆盖量的函数关系

坡度/(°)	60 mm/h		120 mm/h	
	函数关系 $F(x)$	R^2	函数关系 $F(x)$	R^2
5	$T=0.0240x+6.3000$	0.9081	$T=0.0283x+17.8000$	0.7236
10	$T=0.0229x+6.0000$	0.9143	$T=0.0307x+11.5000$	0.8954
5	$I_m=0.0002x+0.7928$	0.5463	$I_m=0.0009x+1.5818$	0.8296
10	$I_m=0.0013x+0.2859$	0.8756	$I_m=0.0006x+1.5671$	0.8575
5	$I_w=0.0007x+0.5239$	0.9637	$I_w=0.0011x+1.2973$	0.7711
10	$I_w=0.0013x+0.1033$	0.9299	$I_w=0.0021x+0.0100$	0.9025
5	$I_c=0.0006x+0.5883$	0.9326	$I_c=0.0011x+1.3279$	0.8107
10	$I_c=0.0014x+0.1178$	0.9573	$I_c=0.0006x+0.5883$	0.9326
5	$S=-0.0003x^2+0.1355x+104.93$	0.8612	$S=-0.0003x^2+0.1377x+111.44$	0.7320
10	$S=-0.0002x^2+0.0789x+103.40$	0.8119	$S=-0.0001x^2+0.0577x+115.14$	0.8458

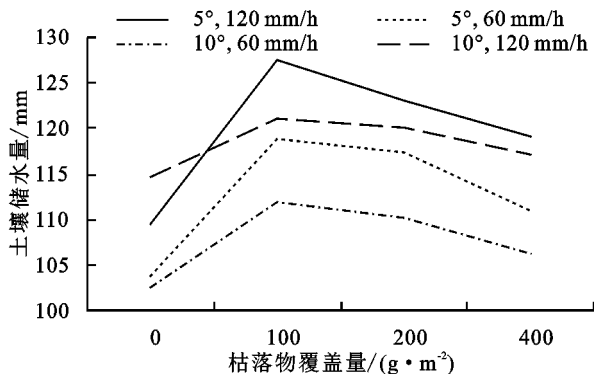


图 3 土壤整体储水量对枯落物覆盖量的响应

土壤入渗滞后时间是反映不同坡面处理下枯落物层截留能力的重要内容。降雨初期,枯落物层和土壤层均处于干燥状态,当坡面产流处于稳定时,入渗

却未处于稳渗阶段,这主要是由于枯落物层的截留作用降低雨滴动能和水分入渗动力。在相同坡度和雨强下,土壤入渗滞后时间与枯落物覆盖量呈正相关关系,由于枯落物量决定了枯落物持水储水有效空间大小^[25],枯落物覆盖量越大,对雨滴动能影响越大。雨滴动能减小与坡面水分运移路径 L 相关,当枯落物覆盖量相同时,坡度越大, L 越大,入渗滞后时间越长。

土壤初始入渗率与土壤含水量密切相关,10—20 cm 土层含水量低于 0—10,20—30 cm 土层,有较高的水势梯度,其初始入渗率较高。随着枯落物覆盖量、降雨强度增加,初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率 3 个特征参数变化一致,均随之增加。这是由于枯落物储水量与覆盖量呈正比。土壤紧实度随着土层深度的增

加而增加,表层土壤较为疏松,储水量最小。当枯落物覆盖量过大,枯落物层吸收大量水分,使得降雨雨滴不能穿过枯落物层到达土壤层,土壤储水量减少。

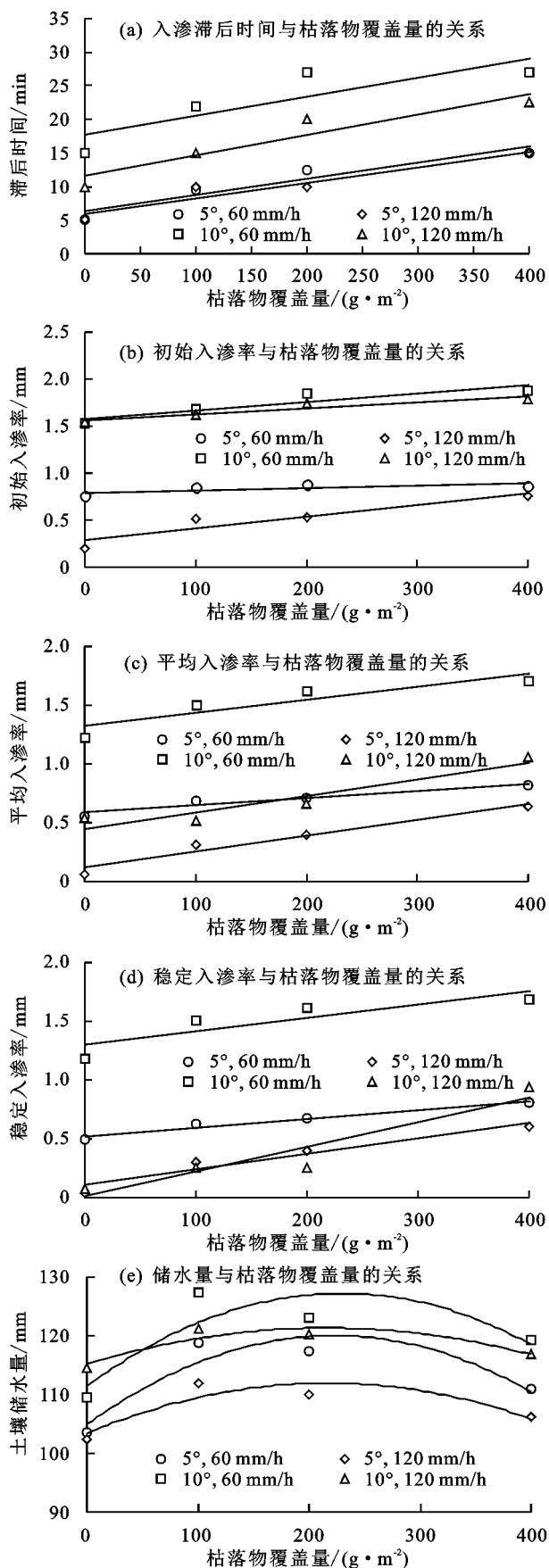


图4 土壤入渗特征参数与枯落物覆盖量的关系

4 结论

(1) 枯落物覆盖可以增大表面糙度,增加坡面水流阻力系数,使得坡面径流量减少,同时增加土壤入渗。土壤入渗滞后时间在不同雨强下存在显著差异,大雨强(120 mm/h)下的入渗滞后时间大于中雨强(60 mm/h)下;坡度与土壤入渗滞后时间相关性极显著($p < 0.001$),坡度越大,雨滴在入渗方向上实际运移路径越长,入渗阻力增大,土壤入渗滞后时间为 $10^\circ > 5^\circ$ 。枯落物覆盖量增加,枯落物层厚度增加,雨滴经过枯落物层能量消耗越大,因此入渗滞后时间随枯落物覆盖量增加而增大。

(2) 从整体来看,随着枯落物覆盖量增加,土壤入渗率增大,储水量先增大后减小。从分层来看,枯落物层对土壤入渗的影响随土层深度逐渐降低,这是由于土壤初始含水率随土层深度先减小后增大,在重力势能和基质能作用下,土壤入渗率、储水量与土壤含水率呈相反变化。随着覆盖量与土层深度增加,枯落物层对土壤入渗的促进作用逐渐减缓。

(3) 通过量化枯落物覆盖量与入渗特征参数的关系,可以直观发现滞后时间、入渗率与枯落物覆盖量呈一次函数正相关关系,储水量与覆盖量呈二次函数关系。坡度对入渗滞后时间具有极显著影响($p < 0.01$),同时雨强对入渗率、储水量具有极显著影响($p < 0.01$)。除了枯落物、坡度及雨强等影响因素,温度也是影响土壤入渗的重要因素,因此探究土壤温度在水分入渗过程中的变化情况及其对入渗参数的影响将是下一步研究的目标。

参考文献:

- [1] 黄俊,金平伟,李敏,等.径流小区尺度土壤入渗率影响因素与估算模型研究[J].农业机械学报,2016,47(8):171-178.
- [2] Sato Y, Kumagai T, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers—the effects of rainfall conditions and leaf shapes[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(16):3007-3018.
- [3] 陈佩岩,马岚,梅雪梅,等.降雨过程中不同密度枯落物对各土层含水率动态影响[J].北京林业大学学报,2018,40(11):93-101.
- [4] 侯贵荣,余新晓,刘自强,等.不同降雨强度下北京山区典型林地土壤水分时空变化特征[J].水土保持学报,2017,31(3):209-215.
- [5] 邹小阳,牛文全,许健,等.残膜对土壤水分入渗的影响及入渗模型适用性分析[J].灌溉排水学报,2016,35(9):1-7,12.
- [6] 王东旺,吕廷波,何新林,等.不同覆膜宽度对棉花土壤水分及地温的影响研究[J].节水灌溉,2018(12):33-37,43.

- [4] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):3-12.
- [5] 赵广举, River M, 穆兴民, 等.近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.
- [6] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J].水力发电学报,2016,35(10):1-11.
- [7] 林学钰,廖资生,苏小四,等.黄河流域地下水资源及其开发利用对策[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(5):677-684.
- [8] 王国庆,王云璋.渭河流域产流产沙模型及径流泥沙变化原因分析[J].水土保持学报,2000,14(4):22-25.
- [9] 陈广圣,马静.渭河流域输沙量变化规律分析[J].人民珠江,2014,35(6):75-78.
- [10] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等.基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别[J].生态学报,2018,38(21):7607-7617.
- [11] 胡安焱,刘燕,郭生练,等.渭河流域水沙多年变化及趋势分析[J].人民黄河,2007,29(2):41-43.
- [12] 左德鹏,徐宗学,隋彩虹,等.气候变化和人类活动对渭河流域径流的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(2):115-123.
- [13] 焦菊英,马祥华,王飞,等.渭河流域侵蚀产沙强度的区域分异特征[J].水土保持研究,2004,11(4):60-63.
- [14] 李同昇,刘彦随,刘晓琼,等.基于小波多尺度变换的渭河水沙演变规律研究[J].地理科学,2015,35(2):211-217.
- [15] Buendia C, Herrero A, Sabater S, et al. An appraisal of the sediment yield in western Mediterranean river basins[J].Science of The Total Environment,2016,572:538-553.
- (上接第 90 页)
- [7] 王红兰,唐翔宇,张维,等.施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):107-112.
- [8] 魏永霞,王鹤,刘慧,等.生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J].农业机械学报,2019,50(9):290-299.
- [9] 陈胜男,胡钧铭,徐宪立,等.绿肥压青粉垄保护性耕作对土壤水分入渗及其后延效应的影响[J].中国农业气象,2018,39(12):778-785.
- [10] 于庆峰,苗庆丰,史海滨,等.耕作方式对秸秆覆盖玉米田春播期土壤水热盐状况的影响[J].水土保持研究,2019,26(3):265-268.
- [11] 张金珠,王振华,虎胆·吐马尔白.具有秸秆夹层层状土壤一维垂直入渗水盐分布特征[J].土壤,2014,46(5):954-960.
- [12] 韩胜强,王振华,李文昊,等.不同可降解膜覆盖对一维土柱土壤水分入渗和蒸发的影响[J].中国农村水利水电,2019(8):42-46.
- [13] 何子森,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外草被坡面土壤入渗参数变化规律与模拟研究[J].水土保持学报,2018,32(2):74-79.
- [14] 张敬晓.黄土丘陵区林地干化土壤水分入渗及迁移规律研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [15] 舒维花,蒋齐,王占军,等.宁夏盐池沙地不同密度人工柠条林土壤水分时空变化分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(12):172-176.
- [16] 曹云生,赵艳玲.不同灌木林分枯落物层与土壤层水源涵养能力研究[J].水土保持研究,2019,26(6):179-183.
- [17] 阿茹·苏里坦,常顺利,张毓涛.天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟[J].生态学报,2019,39(24):9111-9118.
- [18] 倪含斌,张丽萍.神东矿区堆积弃土坡地入渗规律试验研究[J].水土保持学报,2007,21(3):28-31.
- [19] 薛建辉,郝奇林,何常清,等.岷江上游两种亚高山林分枯落物层水文特征研究[J].水土保持学报,2009,23(3):168-172.
- [20] 李波,李晔,韩惟怡,等.人工降雨条件下不同粒径泥沙中氮磷流失特征分析[J].水土保持学报,2016,30(3):39-43.
- [21] 李兆松,王兵,汪建芳,等.铁杆蒿与白羊草枯落物覆盖量对黄土坡面流水动力特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(17):151-157.
- [22] 刘绪军,任宪平,杨亚娟,等.东北黑土区植物篱土壤入渗性能研究[J].水土保持通报,2017,37(2):45-49.
- [23] 付玉娟,祝陈梦媛,张旭东,等.农田下垫面处理对降雨入渗的影响[J].水土保持研究,2019,26(4):74-79.
- [24] 孙佳美,余新晓,李瀚之,等.模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程及特征研究[J].水利学报,2017,48(3):341-350.
- [25] 喻阳华,李光容,严令斌,等.赤水河上游主要树种枯落物调蓄水分解效应[J].中国水土保持科学,2015,13(3):39-44.
- [16] Vente J D, Verduyn R, Verstraeten G, et al. Factors controlling sediment yield at the catchment scale in NW Mediterranean geoecosystems[J].Journal of Soils and Sediments,2011,11(4):690-707.
- [17] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [18] Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J].Hydrological Processes,2002,16(9):1807-1829.
- [19] 徐宗学,张楠.黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J].地理研究,2006,25(1):29-36.
- [20] Hu J, Gao P, Mu X M, et al. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, China[J].Catena,2019,173:234-245.
- [21] 柴雪柯.渭河流域水沙变化及其影响因素[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [22] Wold S, Albano C, Dunn M. Pattern regression finding and using regularities in Multivariate Data[M]. London: Analysis Applied Science Publication,1983.
- [23] 王国华,张虎,魏岳嵩.偏最小二乘回归在 SPSS 软件中的实现[J].统计与决策,2017,475(7):69-73.
- [24] 张学成,匡键,井涌.20 世纪 90 年代渭河入黄水量锐减成因初步分析[J].水文,2003,23(3):43-45.
- [25] 信忠保,许焯心,余新晓.近 50 年黄土高原水土流失的时空变化[J].生态学报,2009,29(3):79-89.
- [26] 刘宇林,赵广举,穆兴民,等.近 55 年渭河流域降雨侵蚀力变化及对输沙量的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(3):15-22.