

模拟降雨条件下黑麦草对土壤水分入渗的影响^①

孙佳美, 余新晓*, 樊登星

(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)

摘要: 利用室内模拟降雨实验的方法, 设计了不同降雨强度(30 mm/h 和 60 mm/h)、不同坡度(10°和 20°)和不同草地盖度(0、20%、40%、60%、80% 和 100%)研究黑麦草影响下土壤水分入渗的变化过程。试验结果表明: 坡度、降雨强度和黑麦草盖度对土壤水分的入渗均有影响, 土壤水分累积入渗量随黑麦草盖度的增加呈增加趋势, 二者显著正相关; 黑麦草覆盖下的土壤水分累积入渗量变化过程能够用考斯加科夫模型模拟, 黑麦草盖度对模型参数有显著影响。各试验条件下, 入渗模型参数 K 值随黑麦草盖度的增加而增加, α 值随黑麦草盖度的增加而减小, 二者的变化趋势在降雨强度 30 mm/h 时表现明显, 但在降雨 60 mm/h 时不明显。

关键词: 降雨; 土壤; 入渗; 黑麦草; 盖度

中图分类号: S152.7.2

土壤水分入渗是降雨转化为地下水的重要过程。土壤的入渗能力一方面决定地表径流的产生过程^[1], 对水资源的形成、转化和利用有重要影响^[2]; 另一方面能够通过影响土壤产沙过程从而影响坡面土壤侵蚀的动态过程。国内外众多学者对土壤入渗能力以及土壤水分入渗过程进行了大量的研究^[3–9], 并逐渐从直观的土壤入渗能力研究过度到由土壤水分入渗模型的建立与研究^[10]。影响土壤水分入渗能力^[11]的因素很多, 包括土壤结构^[12]、土壤含水量^[13]、土壤容重^[14]、降雨强度^[15]等。同时地表覆被也是重要的影响因子之一。地表覆被能够有效减缓降雨侵蚀力^[16–17]并改变土壤水分垂直运动通道和过水断面, 同时植被根系的生长会影响土壤颗粒的组成结构, 增加土壤中的孔隙量^[18], 从而对土壤水分入渗过程产生重要影响^[19]。黑麦草是一种重要的水土保持植物, 具有良好的水土保持效应, 为研究黑麦草对土壤入渗能力的影响, 本文通过人工降雨的方法, 对黑麦草覆盖条件下坡面入渗能力随时间的变化趋势进行了研究分析, 探讨了黑麦草盖度对土壤水分入渗能力的影响, 以为合理利用和分配水资源提供理论依据。

1 研究方法

1.1 实验装置与设计

模拟降雨实验在北京林业大学降雨大厅进行, 降

雨大厅位于北京市鹫峰实验林场, 主要由降水系统、坡面系统和控制系统构成, 共 4 个 8 m × 8 m 的降雨区, 实际降雨控制总面积 256 m², 划分为 4 个独立降雨区, 可以分别降雨, 也可以同时降雨, 有效降雨高度 12 m, 降雨过程计算机全自动控制, 支持手动操作台、计算机监控、计算机全自动模拟降雨控制。采用旋转下喷式喷头、叠加式喷头可模拟自然降雨, 降雨分布均匀度达到 85% 以上, 坡面系统为可自由调节坡度的土槽, 土槽规格为 2 m × 0.5 m × 0.3 m, 槽内盛放褐土, 取自北京市昌平区。土槽尾部设置 V 形收集口, 用来收集形成的径流和泥沙, 底部打孔, 使土壤水可以渗透出土槽外。其他 3 边额外增加 10 cm 高的挡板, 防止泥沙溅出土槽之外。实验坡度为 10° 和 20°, 降雨强度选定 30 mm/h 和 60 mm/h。

黑麦草种植控制盖度分别为 0、20%、40%、60%、80% 和 100%, 采用条带状种植的方法达到控制效果, 首先通过种业公司调查黑麦草种植的最优密度, 将按照最优密度种植作为 100% 的盖度; 然后按照控制盖度比例确定单位面积需要的黑麦草种子质量, 将这些种子条带状均匀种植, 每天保证其日晒时间确保可以正常光合作用生长, 根据其实际生长状况并咨询草业专家认为一般种植 2 个月后即可用于实验, 在进行降水实验时还进一步确定其真实的盖度, 对草进行修剪使其最大化符合实验控制的盖度。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41430747)资助。

* 通讯作者(yuxinxiao11@126.com)

作者简介: 孙佳美(1990—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: sunkami@yeah.net

1.2 实验方法

试验用土为华北土石山区典型土壤:褐土,填土前过 10 mm 土壤筛^[20],对其粒径组成进行分析,其中土壤颗粒粒径在 0.18 ~ 0.5 mm 的最多,占总数的 27.3%,其次是粒径 0.5 ~ 0.9 mm,占 24.22%,粒径小于 0.075 mm 的最少,仅占 3.52%。褐土一般表层体积质量为 1.3 ~ 1.5 g/cm³^[20],结合实验土壤的实际情况设计体积质量为 1.34 g/cm³,按照该设计体积质量分层填土,每 10 cm 一层,下面两层分层填天然细沙,然后铺一层纱布,上面装实验用土。装土时要注意保持土面平整,每层装完要刻意制造一定的地表糙度,防止土的滑移;为保证实验初始含水量相同,对坡面进行预降雨,待土壤达到饱和刚开始产流停止降雨,用塑料布盖上静置 24 h 用于降雨实验;降雨开始后记录产流时间,产流开始后前 10 min 由于径流产生变化较大每 2 min 取 1 个径流样,随后径流稳定后,每 5 min 取 1 次样,测量径流体积后采用烘干法测量径流携带的泥沙量,用于分析土壤侵蚀量,降雨历时为 60 min。

1.3 数据处理

开始降雨后,土壤入渗能力较强,大于降雨强度,降水全部入渗进入土壤,随着降雨的进行,降雨量增加,土壤含水率逐渐增大,土壤入渗能力逐渐减小,直到入渗率等于或小于降雨强度,地表开始积水形成地表径流。坡面平均入渗率可以利用如下公式反推计算^[21]:

$$I = (Pt \cos \alpha - 10R / S) / t$$

式中: I 代表坡面平均入渗率(mm/min); P 代表降雨强度(mm/min); t 代表降雨时间(min); α 代表地面坡

度(°); R 代表 t 时间内产生的径流量(ml); S 代表坡面实际的承雨面积(m²)。

2 结果与分析

2.1 黑麦草盖度对土壤水分入渗总量的影响

土壤水分累积入渗总量随黑麦草盖度变化趋势如下图 1 所示。植被覆盖度通过削弱雨滴打击力和改善下垫面的性质而影响土壤入渗特性。随着入渗时间变化,累积入渗总量随盖度的增加而增加,植被对土壤入渗的改变一是通过拦截降雨减弱雨滴动能,减弱雨滴对地表土壤颗粒的击溅作用,起到一个对雨滴的缓冲作用,随着实验盖度的增加,植被能够拦截的雨滴面积加大,拦截的雨滴增多,从而对土壤表面造成的溅蚀减弱,引起的土壤侵蚀量也会相应地减少;除了拦截雨滴的作用以外植被的种植能够改变土壤物理性质,增大土壤中的孔隙,起到疏松土壤的作用,从而增大土壤水分的入渗总量。

由图 1 可以看出,土壤水分累积入渗总量随黑麦草盖度的增加呈现增加趋势,对其数据进行统计检验,均达到显著水平($P < 0.01$)。在坡度 10°,降雨强度为 30 mm/h 时,当黑麦草盖度从 0 增加到 100%,土壤水分累积入渗总量从 5.817 mm 增加到 6.444 mm,二者呈极显著线性正相关,决定系数为 0.95;当坡度为 20°,降雨强度为 30 mm/h 时,黑麦草盖度从 0 增加到 100%,土壤水分累积入渗总量从 4.463 mm 增加到 6.031 mm,二者呈极显著指数正相关,决定系数为 0.98;当坡度为 10°,降雨强度为 60 mm/h 时,黑麦草盖度从 0 增加到 100%,土壤水分累积入渗总量从 11.101 mm 增加到 11.866 mm,二者呈极显著线性

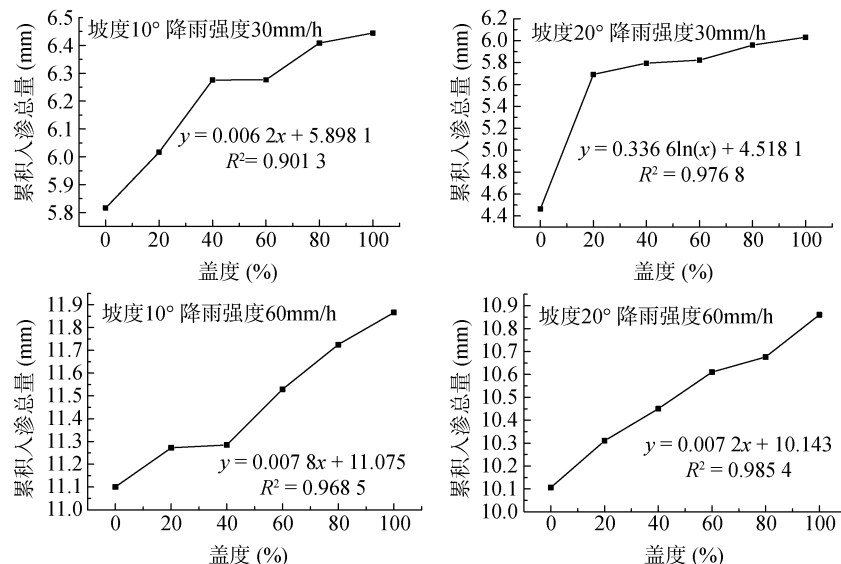


图 1 土壤水分累积入渗总量随黑麦草盖度的变化

Fig. 1 Cumulative infiltration amounts of soil water under different ryegrass coverages

正相关,决定系数为0.98;当坡度为 20° ,降雨强度为 60 mm/h 时,黑麦草盖度从0增加到100%,土壤水分累积入渗总量从 10.106 mm 增加到 10.860 mm ,二者呈极显著线性正相关,决定系数为0.99。

土壤水分累积入渗总量随坡度的增加而减小,这是因为随着地面坡度的增加,水层沿着坡面方向的力将增大,而垂直坡面的压力将减小,超渗产流的起始时间提前,渗入土壤中的水量随之减少,坡面汇水量增大,土壤稳渗率呈下降趋势。因此,在进行坡面土地利用时,应该考虑这一特点,积极创造微地形,改变地表糙度,以尽可能地平缓坡面,减少坡面径流,增加土壤水分入渗。

2.2 土壤水分入渗量随时间的变化过程

累积入渗量是衡量土壤入渗能力的主要因子,尤

其在达到稳渗之前,常用累积入渗量表示入渗能力。对不同坡度、降雨强度和黑麦草盖度进行人工降雨实验,累积入渗量随降雨历时变化过程见图2,从图中可以看出,累积入渗量均随时间延长而增大,地表坡度、降雨强度和黑麦草盖度对土壤水分累积入渗量均有显著影响,土壤水分累积入渗量随降雨历时呈指数变化趋势,符合实践中常用来计算土壤入渗量的考斯加科夫土壤入渗经验模型变化趋势。随着黑麦草盖度的增加,相同降雨历时内,土壤水分累积入渗量减小,在降雨初期,土壤水势梯度比较大,土壤基质的水势梯度是影响土壤入渗的主导因素,各实验条件前期的土壤水势差较大,因此其土壤入渗量差异不显著,植被盖度对土壤入渗的影响不显著;随着降雨历时的增加,土壤含水量增大,水势差减小,植被对土壤水分

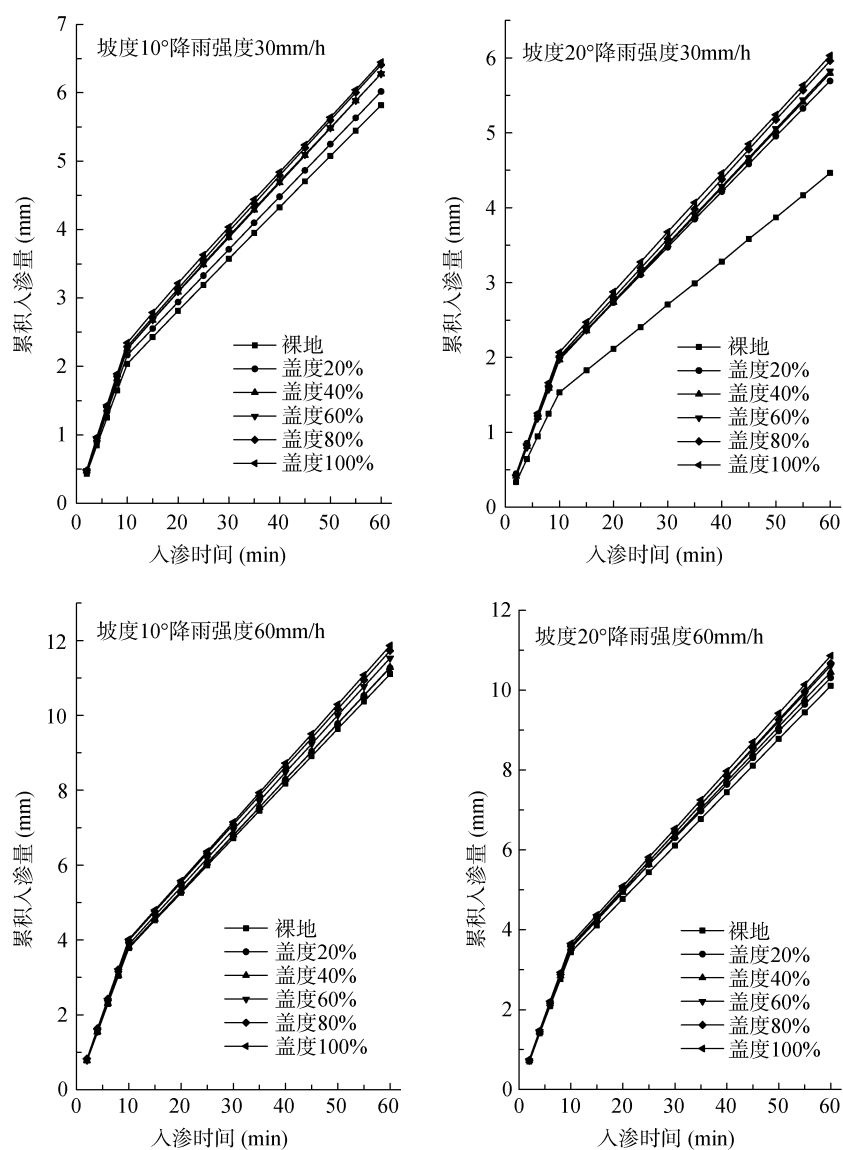


图2 不同黑麦草盖度对土壤水分累积入渗量的影响

Fig. 2 Effect of ryegrass coverage on cumulative infiltration of soil water

入渗的影响差异逐渐体现出来。土壤水分累积入渗量随降雨强度增加显著增大,随黑麦草盖度增加累积入渗量增加,这种增加效应在降雨强度为 30 mm/h 时明显比降雨强度为 60 mm/h 时强,在坡度 10°时比在坡度 20°时增加幅度较明显,这可能是因为土壤水分入渗的过程需要一定的时间积累,在降雨强度较小和坡度较小的条件下,径流流速较慢,单位量的径流流过坡面的时间增长,可以有效增加土壤水分入渗,增加土壤水分累积入渗量。

对土壤水分累积入渗量随降雨历时的变化曲线进行拟合发现,其变化规律符合实践中最常使用的考斯加科夫土壤入渗经验模型公式^[22]:

$$I_t = \frac{i_1}{1-\alpha} t^{1-\alpha} = K \cdot t^{1-\alpha} \tag{1}$$

式中: i_t 代表 t 时刻的入渗速率(mm/min); i_1 代表第一时间单位末尾时的入渗速率(mm/min); t 代表入渗历时(min); I_t 代表 t 时刻的累积入渗量(mm); K 值代表经验入渗系数,其物理意义是入渗开始后第一个单

位时段末的累积入渗量,在数值上也等于第一个单位时段内的土壤平均入渗速率(mm/min); α 代表经验入渗指数,反映土壤入渗能力的衰减速度。入渗初始阶段,参数 K 值的大小起主导作用,随着入渗过程的持续进行,参数 α 值则成了影响入渗大小的主要因素。

对图 2 中各实验条件下土壤累积入渗量随时间变化进行拟合,拟合结果见表 1,经统计检验,均达到显著水平($P<0.01$)。从决定系数 R^2 来看,上述拟合 R^2 均大于临界决定系数 0.983,因此,与裸露均质土壤相同,考斯加科夫模型可以反映在有草被覆盖条件下的土壤水分累积入渗量的变化过程。

2.3 黑麦草盖度对入渗模型参数的影响

根据试验数据计算土壤水分累积入渗量,利用 SPSS 软件对各试验条件下累积入渗量随入渗时间变化进行拟合得出模型参数 K 值和 α 值,拟合所有数据方差的百分比, R^2 均大于 0.981 8,为极显著关系,然后做模型参数值随盖度变化趋势图,如图 3 所示。

表 1 土壤水分累积入渗量随降雨历时变化过程拟合结果
Table 1 Fitting equation of cumulative infiltration amount of soil water in rainfall process

降雨强度 (mm/h)	坡度 (°)	不同黑麦草盖度下拟合方程的决定系数 R^2					
		0	20%	40%	60%	80%	100%
30	10	0.984 2	0.981 8	0.982 1	0.982 5	0.982 4	0.980 8
	20	0.986 3	0.986 2	0.985 8	0.985 3	0.986 2	0.984 9
60	10	0.984 7	0.985 4	0.985 2	0.984 9	0.985 3	0.985 2
	20	0.984 4	0.982 9	0.984 9	0.984 5	0.985 3	0.985 7

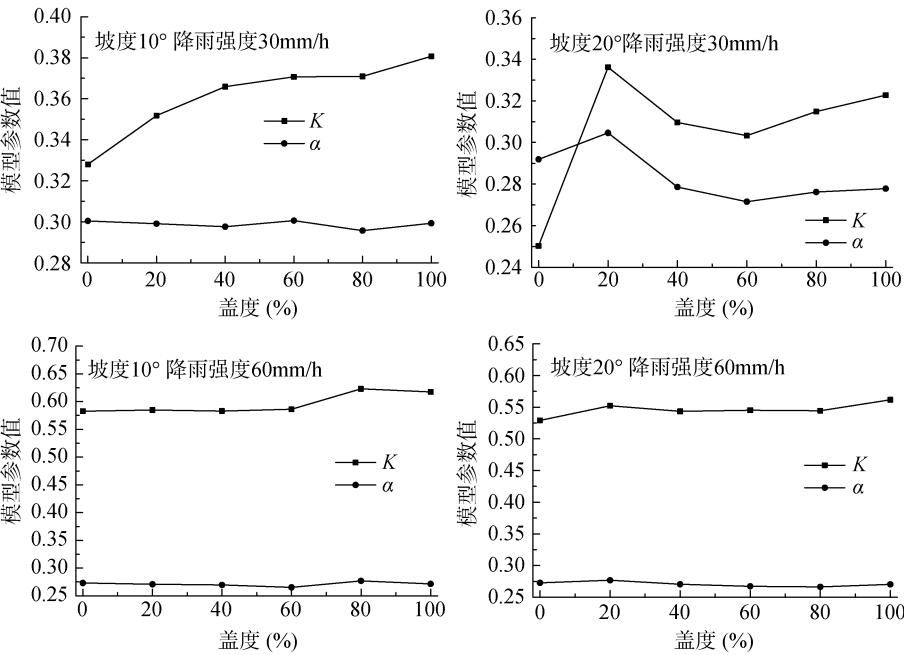


图 3 入渗模型参数值随黑麦草盖度的变化
Fig. 3 Model parameters under different ryegrass coverages

由图3可看出,入渗模型参数 K 值随黑麦草盖度增加而增加, α 值随黑麦草盖度的增加而减小。在坡度 10° ,降雨强度 30 mm/h 时,盖度从 20% 增加到 100% , K 值从 0.328 增加到 0.380 , α 值从 0.301 减小到 0.298 ;在坡度 20° ,降雨强度 30 mm/h 时,盖度从 20% 增加到 100% , K 值从 0.250 增加到 0.322 , α 值从 0.291 减小到 0.277 ;在坡度 10° ,降雨强度 60 mm/h 时,盖度从 20% 增加到 100% , K 值从 0.582 增加到 0.617 , α 值从 0.273 减小到 0.271 ;在坡度 20° ,降雨强度 60 mm/h 时,盖度从 20% 增加到 100% , K 值从 0.529 增加到 0.561 , α 值从 0.273 减小到 0.270 。同时,由图3可看出, K 值和 α 值的变化趋势在降雨强度 30 mm/h 时表现比较明显,但在降雨强度 60 mm/h 时增加和减小幅度比较小。

在考斯加科夫土壤入渗经验模型中参数 K 是反映土壤入渗能力的重要指标,能够反映土壤开始入渗的第一个单位时间内单位面积上的平均入渗速率或第一个单位时段末单位面积土壤的累积入渗量,其大小受多种因素影响,主要影响因素是土壤的结构状况。在本实验研究过程中,土壤质地条件相同,原始含水量也基本一致,参数 K 主要是受土壤孔隙度状况影响。在有植被的土壤中,由于根系的生长作用,会大大增加土壤的孔隙度,尤其是增加大孔隙数量;水分入渗初期由于重力作用向下流动,在经过孔隙时水分会存储到孔隙当中,孔隙越多能够存储的水量越大,则其入渗能力越强, K 值恰好能够反映降雨初期土壤的入渗能力。在本研究实验条件下参数 K 主要受地表植被状况影响,黑麦草的根部在生长过程中会导致土壤疏松,增加土壤中孔隙的数量,从而增加入渗能力,盖度增加后,相应的土壤中的根系量加大,孔隙量也增加,从而入渗能力增强。因此,参数 K 值随黑麦草盖度的增大而增大。

α 值为经验入渗指数,能够反映土壤入渗能力的衰减程度, α 值越大,土壤水分入渗能力衰减速度越快, α 值越小,土壤水分入渗能力衰减速度越慢, α 值主要由土壤结构特征决定,能够反映土壤在逐渐湿润过程中的变化快慢程度。黑麦草盖度增加后土壤中的孔隙尤其大孔隙量增加,随着入渗过程的进行,土壤中开始充满水分,土粒开始膨胀,小孔隙受土壤膨胀作用影响较大,但是大孔隙受影响很小,仍然具有一定的吸收和排放水分的能力,对水分运动的气象阻力也比较小,随着黑麦草盖度的增加,孔隙量增加,气相比例增加,土壤内部由于大孔隙较多其连通性好,入渗受到的气相阻力较小,入渗能力较好,孔隙被充满的过程也比较慢,入渗能力衰减速度较慢。因

此黑麦草盖度越大,土壤水分入渗能力衰减速度越慢,用模型表示这个现象就是 α 值随黑麦草盖度增加而减小。

3 结论

(1) 地表坡度、降雨强度和黑麦草盖度对土壤水分的入渗能力均有显著影响,土壤水分累积入渗量随黑麦草盖度的增加呈增加趋势,二者显著正相关。

(2) 对各实验条件下土壤水分累积入渗量随降雨历时的变化曲线进行拟合发现,其变化规律符合实践中最常使用的考斯加科夫土壤入渗经验模型公式,且拟合显著,表明考斯加科夫模型可以反映在有草被覆盖条件下的土壤水分累积入渗量的变化过程。

(3) 黑麦草盖度对考斯加科夫土壤水分入渗经验模型有显著影响,各试验条件下,入渗模型参数 K 值随黑麦草盖度增加而增加, α 值随黑麦草盖度的增加而减小,二者的变化趋势在降雨强度 30 mm/h 时表现明显,但在降雨强度 60 mm/h 时不明显。

参考文献:

- [1] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 871-878
- [2] 赵景波, 陈颖, 曹军骥, 张冲, 胡建. 青海湖西北部土壤入渗规律研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2011(3): 90-96
- [3] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 75-80
- [4] 张治伟, 朱章雄, 王燕, 傅瓦利, 文志林. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 71-76
- [5] Nanko K, Onda Y, Ito A, Moriwaki H. Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 151(9): 1 173-1 182
- [6] 胡建朋, 杨吉华, 罗明达, 李星辰. 山东石灰岩山地不同林分类型土壤入渗特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 54-58
- [7] 刘春成, 李毅, 任鑫, 马孝义. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 62-67
- [8] 王维汉, 陈晓东, 缴锡云, 罗安民. 土壤入渗参数的估算方法及其变异性研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 272-275
- [9] Grønsten HA, Lundekvam H. Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the WEPP Hillslope model[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1/2): 186-199
- [10] Keim RF, Skaugset AE, Weiler M. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(7): 974-986

- [11] Léonard J, Ancelin O, Ludwig B, Richard G. Analysis of the dynamics of soil infiltrability of agricultural soils from continuous rainfall-runoff measurements on small plots[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 326(1/2/3/4): 122–134
- [12] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 何淑勤, 文毅, 干晨兵. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 33–36
- [13] 席彩云, 余新晓, 徐娟, 张振明, 朱建刚, 王琛, 庞卓, 王纳丽. 北京密云山区典型林地土壤入渗特性[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(5): 42–47
- [14] 朱冰冰, 张平仓, 丁文峰, 任红玉. 长江中上游地区土壤入渗规律研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(4): 43–47
- [15] 闫东锋, 杨喜田. 豫南山区典型林地土壤入渗特征及影响因素分析[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(6): 43–50
- [16] 卢晓杰, 李瑞, 张克斌. 农牧交错带地表覆盖物对土壤入渗的影响[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 1–5
- [17] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 卜崇峰. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(7): 870–875
- [18] 席海洋, 冯起, 程玉菲, 司建华, 常宗强, 苏永红, 郭瑞. 额济纳绿洲土壤入渗特征与土壤状况的关系研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(06): 976–982
- [19] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 刘汉. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1 040–1 045
- [20] 王志伟, 陈志成, 艾钊, 张国庆, 张永涛. 不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 17–20, 26.
- [21] 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 64–67
- [22] 李卓, 吴普特, 冯浩, 赵西宁, 黄俊, 庄文化. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 40–45

Effects of Ryegrass on Processes of Soil Infiltration Under Simulated Rainfall

SUN Jia-mei, YU Xin-xiao*, FAN Deng-xing

(Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil and water loss can cause the depletion of land resource and the degradation of eco-environment in many areas of China, which is the main reason of the reduction of local agricultural and industrial productivity. The process of soil infiltration has a major impact on the effect of soil and water conservation. To research how ryegrass influence the effect of soil and water conservation, the experiments in the conditions of different rainfall intensities, slopes and vegetation coverages (0, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%) with the method of simulated rainfall were conducted. The results showed that: slope, rainfall intensity and vegetation coverage had a significant impact on the process of soil infiltration, the cumulative amount of water infiltration increased with the increase of vegetation cover, existing a significant positive correlation. The vegetation coverage also had an obvious influence on the model parameters of Kostiaikov infiltration model, the parameter K increased but the parameter α decreased with the increase of the vegetation coverage of ryegrass. The change trend was the most notable in 30 mm/h rainfall intensity.

Key words: Rainfall, Soil, Infiltration, Ryegrass, Coverage