

黄丘区野外草被坡面土壤入渗参数变化规律与模拟研究

何子森^{1,2}, 肖培青², 郝仕龙^{1,3}, 杨春霞²

(1. 华北水利水电大学资源环境学院, 郑州 450045;

2. 黄河水利科学研究院, 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003;

3. 南阳师范学院, 南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心, 河南 南阳 473061)

摘要: 利用黄丘区第三副区野外坡面模拟降雨试验, 研究了 3 种覆盖度(30%, 60%, 90%)和 5 种降雨强度(1, 1.5, 2, 2.5, 3 mm/min)下 15°草地坡面土壤入渗过程变化规律。结果表明:(1)土壤入渗率随着草被覆盖度和降雨强度的增加不断增大, 草被覆盖度越大, 土壤入渗率的增加效果越显著, 土壤初始入渗率与降雨强度呈指数函数关系, 土壤稳定入渗率与降雨强度呈幂函数关系。(2)土壤累积入渗量与降雨时间呈良好的幂函数关系, 草被覆盖度越大, 土壤累积入渗增量越明显, 降雨强度对土壤累积入渗量的影响存在阶段性差异。(3)草被覆盖度的增加能明显提高土壤入渗系数, 随雨强的增大, 土壤入渗系数不断减小, 自然草被覆盖度(60%)下, 草被增加土壤入渗系数的有效降雨强度为 1~1.5 mm/min。(4)利用 4 个入渗模型对土壤入渗速率与降雨时间的关系进行拟合, 研究结果表明 Horton 公式能较好的模拟该区土壤入渗过程。

关键词: 黄丘区; 降雨强度; 草被覆盖度; 土壤入渗

中图分类号: S154.4; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0074-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.011

Study on the Change and Simulation of Soil Infiltration Parameters on the Field Grass Slope in the Loess Hilly Region

HE Zimiao^{1,2}, XIAO Peiqing², HAO Shilong^{1,3}, YANG Chunxia²

(1. School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045;

2. Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003; 3. Henan Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Mid-line of South-to-North Diversion Project, Nanyang Normal University, Nanyang, Henan 473061)

Abstract: Effects of grass coverage degree (30%, 60%, 90%) and rainfall intensity (1, 1.5, 2, 2.5, 3 mm/min) on the soil infiltration process on the 15° grass slope were studied under simulated rainfall condition in the third subregion of loess hilly region. The results were as follows: (1) Soil infiltration rate increased with the increase of grass cover and rainfall intensity, while the soil infiltration rate increased significantly with the increase of grass coverage rate. The initial infiltration rate of soil and rainfall intensity presented exponential relationship. The soil stability infiltration rate and rainfall intensity showed the power function relations. (2) The cumulative soil infiltration and rainfall time had a good power function relationship. The cumulative infiltration of soil increased significantly with the increase of grass coverage rate. The effect of rainfall intensity on soil cumulative infiltration showed phase-based difference. (3) The increase of grass cover could significantly increase the soil infiltration coefficient, the soil infiltration coefficient decreased with the increase of rain intensity. Under the coverage of field grass (about 60%), the effective rainfall intensity of grass cover in increasing soil infiltration coefficient was between 1~1.5 mm/min. (4) The relationship between soil infiltration rate and rainfall time was fitted by four infiltration models, and the Horton formula was found could well simulate the soil infiltration process.

Keywords: loess hilly region; rainfall intensity; grass cover; soil infiltration

黄土丘陵沟壑区地处我国干旱半干旱地带, 是黄土高原最辽阔的地貌, 生态环境极其脆弱。土壤入渗

对降雨的再分配过程有重要影响, 研究土壤入渗过程, 辨析土壤入渗规律, 对增加土壤入渗和缓解当地

收稿日期: 2017-11-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571276, 41701326); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2016-33)

第一作者: 何子森(1990—), 男, 在读硕士, 主要从事土壤侵蚀模拟与监测研究。E-mail: zimiaohe@163.com

通信作者: 肖培青(1972—)女, 博士, 教授级高工, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: peiqingxiao@163.com

生态农业需水压力具有重要意义^[1-2]。

植被措施作为水土保持的重要措施,在增加土壤入渗方面具有积极作用^[3]。大量研究表明植被可以改善土壤参数,如土壤紧实度、容重、水稳性团粒含量、有机质含量等,从而增加了土壤入渗^[4-7]。姚文艺等^[8]通过室内模拟降雨试验,发现裸地的下渗率明显小于草地与灌木地;初渗率与稳渗率之间的差值裸地最大,草地最小;肖培青等^[9]研究了人工草地的入渗过程,结果表明随着草被覆盖度的增大,草地入渗率呈现不断增大的趋势;陈洪松等^[10]的研究表明,草被覆盖度能显著延缓产流,增加入渗,并促进土壤水分向深层运移;吴希媛等^[11]研究认为,在诸多影响因素中,雨强是影响入渗的决定性因素,但随着覆盖度的增加,覆盖度与降雨强度之间的交互性影响逐渐显著;李毅等^[12]通过分析人工草地覆盖度和雨强对入渗过程的影响,认为黄绵土坡面土壤入渗率与降雨历时和草地覆盖度有指数函数的关系。上述研究多以室内研究为主,研究对象多为人工植被,野外坡面和自然植被坡面土壤入渗过程研究较少,基于此,本文选择野外自然坡面布设小区,利用人工模拟降雨装置,研究草被覆盖度及雨强对入渗特征的影响,以期对黄丘区植被恢复建设提供科技支撑。

1 研究区概况

研究区设在天水市罗玉沟水土保持科学试验站内,位于甘肃省天水市北郊。罗玉沟流域地处 105°

30′—105°45′E,34°34′—34°40′N,是渭河一级支流籍河的一条支沟,属于黄土丘陵沟壑区第三副区,为典型的黄土丘陵地形地貌,沟壑密度 3.54 km/km²,平均坡度 18°。该流域属温带大陆性气候和亚热带气候的过渡地带,年平均气温为 7~11℃,多年平均降雨量 533.7 mm,5—10 月的降雨量约占年降雨量的 80%,且多以暴雨形式出现,降雨范围小,历时短,强度大,年蒸发量 1 391 mm。流域土壤类型主要为褐土、黑垆土和红黏土;土壤结构疏松多孔,总的孔隙度约 50%,容重 1.40 g/cm³,土壤可耕性良好,但板结严重,通气透水性较差;土壤具有绵酥性,结持力小,抗蚀性差。

2 试验设计与研究方法

2.1 试验小区

经实地查勘,选择在罗玉沟流域下游一块天然撂荒地(撂荒时间约 20 年)坡面布设 10 个野外试验小区,小区坡度约 15°,海拔约 1 500 m。试验小区长 10 m,宽 2 m,面积 20 m²。小区土壤类型为低液限黏土,土壤颗粒粒径均 <0.25 mm,其中在 0.25~0.075 mm 的颗粒粒径占比 0.8%,在 0.075~0.005 mm 的颗粒粒径占比 69.8%,<0.005 mm 的颗粒粒径占比 29.4%。小区地表野生植被以草类为主,主要有小冠花(*Coronilla varia*)和龙须草(*Juncuseffusus*)。试验小区草被不同覆盖度为 30%,60%和 90%,各小区立地条件见表 1。

表 1 试验小区基本立地条件

草被覆盖度/%	小区坡面草被情况	孔隙比	容重/(g·cm ⁻³)	前期含水量/%
30	龙须草、小冠花混杂生长,龙须草占 70%。通过坡面 5 个断面 10 个 20 cm×20 cm 样方调查,龙须草平均株高 12.5 cm,须根长 14.6 cm;小冠花平均株数为 3 株,平均株高 20.3 cm,主根长 72.5 cm	0.97	1.37	19.5
60	龙须草、小冠花混杂生长,龙须草占 65%。通过坡面 5 个断面 10 个 20 cm×20 cm 样方调查,龙须草平均株高 12.2 cm,须根长 13.4 cm;小冠花平均株数为 7 株,平均株高 21.5 cm,主根长 65.5 cm	1.03	1.34	20.2
90	龙须草、小冠花混杂生长,龙须草占 75%通过坡面 5 个断面 10 个 20 cm×20 cm 样方调查,龙须草平均株高 12.8 cm,须根长 15.3 cm;小冠花平均株数为 8 株,平均株高 19.6 cm,主根长 75.5 cm	1.05	1.31	20.1

2.2 试验装置

试验降雨装置采用 QYJY-501 人工模拟降雨系统设备,由主控器、水泵、降雨喷头、雨量计和数据下载分析软件等部分组成。降雨喷头有 5 组,每组有 3 个不同孔径喷头,喷头可单独或组合使用,降雨时选择喷头组合和压力读数实现不同雨强的降雨。降雨装置通过雨量计数据对降雨进行实时反馈调控,所形成的降雨在雨强、雨滴落速、雨滴粒径等方面与天然降雨有 80%以上的相似度。

2.3 试验过程与数据采集

试验于 2016 年 7—9 月进行。根据当地季节降雨和草被覆盖特征,设计 1.5 mm/min 下不同草被覆盖度(30%,60%,90%)和不同雨强(1,1.5,2,2.5,3 mm/min)下自然草被(60%)坡面 8 个试验组次,每个试验组次至少重复 1 场,然后根据试验现场情况和试验结果进行补充试验,共进行 20 场降雨试验。每场降雨历时均为 60 min。试验前 1 天,测量试验小区表层土壤体积含水率,采用洒水和延后试验的方法

保证土壤体积含水率稳定在 20%；降雨前，先用雨布遮盖小区，雨强率定后，撤掉雨布，开始试验；降雨试验中，利用挡风棚减弱风因素的影响；利用径流桶对径流泥沙样进行收集，采样间隔为 2 min，持续到试验结束；试验后，采用称重—沉淀—晾晒—称重和取样—烘干—称量校正的方法，分别获得产流量和产沙量。忽略草被截留、填洼及降雨期间的蒸发，各时段的降雨入渗率为：

$$f(t) = R \cos \alpha - 10V / [(t_{i+1} - t_i)S] \quad (1)$$

式中： $f(t)$ 为降雨入渗率 (mm/min)； R 为降雨强度 (mm/min)； α 为坡面坡度 (°)； V 为各时段对应的产流量 (mL)； t_i, t_{i+1} 为各时段段末时间 (min)； S 为坡面面积 (cm²)。

2.4 土壤入渗模型

土壤入渗模型是为模拟雨水在土壤中的下渗过程而建，用于描述雨水在土壤中随时间变化的过程，是揭示土壤入渗规律的重要手段和方法。目前，土壤入渗模型主要有 Kozyakov 公式、Horton 公式、Philip 公式和通用经验公式^[13-14]。公式表达式依次为：

$$f(t) = at^{-b} \quad (2)$$

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

$$f(t) = f_c + 0.5st^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$f(t) = c + a_1t^{-b_1} \quad (5)$$

式中： $f(t)$ 为 t 时刻入渗率 (mm/min)； f_0 为初始入渗率 (mm/min)； f_c 为稳定入渗率 (mm/min)； t 为入渗时间 (min)； s 为土壤吸湿率； a, a_1, b, b_1, k, c 为试验求得的参数。

3 结果与分析

3.1 土壤入渗率对草被覆盖度和降雨强度的响应

从图 1 可以看出，不同草被覆盖度下，土壤入渗率在 0.4~1.5 mm/min 范围内变化。整个降雨历时过程中随降雨的持续，土壤入渗率不断降低，降低速率逐渐减缓后趋于稳定。

不同草被覆盖度条件下土壤入渗率有明显的层次变化。在降雨前期(降雨开始至 6 min)，90% 草被覆盖度最大土壤入渗率是 60% 草被覆盖度最大土壤入渗率的 1.2 倍，60% 草被覆盖度最大土壤入渗率是 30% 草被覆盖度最大土壤入渗率的 1.2 倍，表明在降雨前期草被覆盖度能稳定增大土壤入渗率。在降雨中后期(25~60 min)，60% 草被覆盖度土壤入渗率是 30% 草被覆盖度土壤入渗率的 1.2 倍，90% 覆盖度土壤入渗率是 60% 覆盖度土壤入渗率的 1.4 倍，说明降雨中后期草被覆盖度越大，增加土壤入渗率的作用越显著。30% 草被覆盖度下土壤入渗率最大值是最小值的 2.4 倍，60% 草被覆盖度下最大值是最小值的

2.1 倍，90% 草被覆盖度下最大值是最小值 2.0 倍，表明最大土壤入渗率与最小土壤入渗率的比值随着草被覆盖度的增加不断减小，草被覆盖度提高土壤稳定入渗率的作用强于提高土壤初始入渗率的作用。

在土壤降雨入渗中，优先流现象普遍存在，对土壤入渗速率有重要影响^[15]。植物根系对土壤优先流的形成具有重要作用，其根系组成的空间网络结构是形成土壤大孔隙的重要因素之一，是产生优先流现象的主要机制^[16]。本研究中，龙须草草根为须根，分布在 0—20 cm 土层，小冠花草根为主根，根茎 0.3~0.6 cm，分布在 0—100 cm 土层，2 种草被根系在土壤中交错分布，促进了土壤孔隙的形成与产生。已有研究结果表明植被覆盖度越大，植被根系越密集，形成的土壤孔隙越多^[17]，这与本文中草被覆盖度越大，土壤入渗速率增加越明显的结论一致。

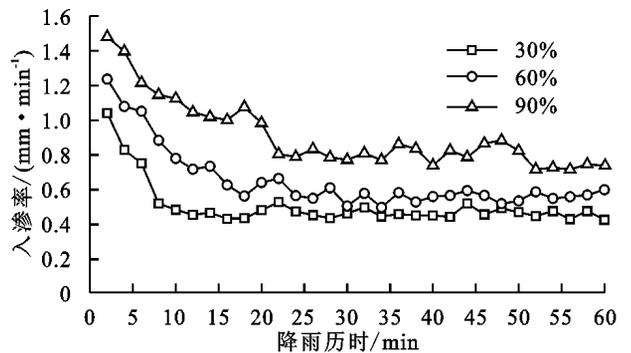


图 1 不同草被覆盖度下土壤入渗过程

雨强是影响土壤入渗率的关键因素之一。从图 2 可以看出，在不同降雨强度下，土壤入渗率在 0.5~1.9 mm/min 范围内变化，且随降雨的持续总体呈下降趋势。其中，土壤初始入渗率随降雨强度的增加呈逐渐增大趋势，不同降雨强度间差异性明显，降雨强度越大，土壤初始入渗率增加的幅度越明显，这一结论与李毅等^[12]和郝春红等^[18]关于降雨强度对土壤入渗影响的研究结论一致。分析认为，降雨初期，土壤水分主要受水体自重力、毛管吸力和雨滴打击挤压力的作用，在降雨强度小于土壤的初始入渗率时，入渗率随降雨强度的增加而增加，当降雨强度大于土壤的初始入渗率时，毛管吸力作用减弱，降雨强度对土壤入渗率的影响主要体现在雨滴打击形成的打击力上，降雨强度越大，雨滴打击地面形成的冲击力也就越大，土壤初始入渗率也就越高。

对降雨强度与入渗率的关系进行数值模拟，发现降雨强度与初始入渗率呈显著的指数函数关系，表达式为 $y = 0.9271e^{0.2161x}$ ($R^2 = 0.9480, n = 20$)，降雨强度与稳定入渗率呈显著的幂函数关系，表达式为 $y = 0.5376x^{0.3049}$ ($R^2 = 0.9126, n = 20$)。

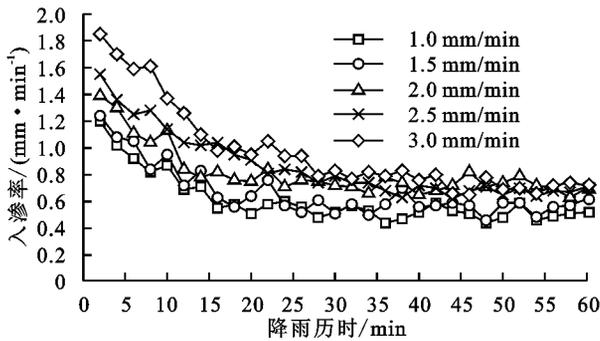


图 2 不同降雨强度下土壤入渗过程

在 1~2 mm/min 降雨强度变化范围内,随降雨强度的增大,土壤稳定入渗率呈逐渐增加的趋势,在 2~3 mm/min 降雨强度变化范围内,随降雨强度的增大稳定入渗率无明显变化且趋于一个定值,表明在 1~2 mm/min 降雨强度变化范围内,降雨强度增大能增加土壤的稳定入渗率,当降雨强度 > 2 mm/min 时,增大降雨强度对土壤稳定入渗率的影响不明显;或者说,在 2 mm/min 降雨强度附近,存在降雨强度增大土壤稳定入渗率的限值。小降雨强度到大降雨强度土壤入渗速率最大值与最小值的比值分别为 1.91, 2.18, 2.21, 2.35, 2.59。可见,随降雨强度的增大,这一比值不断增加,表明降雨强度增加土壤初始入渗率的作用强于增加土壤稳定入渗率的作用。

降雨强度在优先流运动过程有着重要影响^[19],已有研究表明降雨强度较小时优先流基本不发育,随降雨强度的增大,土壤优先流速率及其增加的幅度均随降雨强度的增加而显著增加,但当降雨强度接近或大于其最大导水能力时,优先流速率增加缓慢或趋于稳定^[20]。试验中表现为降雨强度对土壤初始入渗率增加明显,对稳定入渗率增加不明显的特征。由于草被覆盖度与降雨强度对优先流作用机理的不同,试验中表现为草被覆盖度与降雨强度对土壤初始入渗率和稳定入渗率的影响有一定的差异性。

3.2 土壤累积入渗量对草被覆盖度和降雨强度的响应

不同草被覆盖度和降雨强度下,随降雨的持续土壤累积入渗量均呈现不断增加的趋势;土壤累积入渗量曲线斜率均呈现前期大、后期逐渐变缓的趋势。这是由于降雨前期,土壤入渗速度快,入渗量增加明显,随降雨的持续,入渗率逐渐降低,累积入渗量增加趋势也随之变缓。对不同草被覆盖度和降雨强度下土壤累积入渗量与降雨时间的变化进行模拟分析,发现土壤累积入渗量与降雨时间均呈现良好的幂函数关系(表 2)。

从图 3 可以看出,不同草被覆盖度下土壤累积入渗量差异明显,草被覆盖度越大土壤累积入渗量越多。30%草被覆盖度下单位面积土壤累积入渗量为 31.41 mm,60%覆盖度下入渗量为 39.95 mm,90%覆盖度下入渗量为 55.59 mm,与草被覆盖度由 30%到

60%的变化相比,草被覆盖度由 60%增加到 90%引起的土壤累积入渗增量更为显著。已有研究结果表明草被对降雨入渗的作用表现在 2 个方面:一是草被地面以上部分,包括茎叶的截留及对径流的拦蓄作用延长了土壤入渗时间^[21],草被对径流的拦蓄增加了径流深度,加大了地表水层的压力,促进了水分的土壤入渗;二是草被根系部分,包括改善土壤结构、增加有机质含量和土壤孔隙度^[22-23]。试验小区坡面随着草被覆盖度的增加,草被茎叶分布越密集,径流深度越大,土壤孔隙越多,因而,土壤入渗的能力明显增强。

表 2 土壤累积入渗量(y)与降雨历时(x)的关系

影响因素	因素条件	拟合方程	相关系数
覆盖度/%	30	$y=1.4084x^{0.7497}$	0.9964
	60	$y=1.9930x^{0.7268}$	0.9970
	90	$y=1.8015x^{0.8427}$	0.9989
降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	1.0	$y=1.2090x^{0.8449}$	0.9982
	1.5	$y=1.8662x^{0.7503}$	0.9985
	2.0	$y=1.8520x^{0.8035}$	0.9972
	2.5	$y=2.2393x^{0.7773}$	0.9971
	3.0	$y=2.8568x^{0.7506}$	0.9932

从图 4 可以看出,随降雨强度的增大土壤累积入渗量不断增大。降雨强度在 1~1.5 mm/min 和 2~2.5 mm/min 变化范围土壤累积入渗量增幅较小;但是,降雨强度在 1.5~2 mm/min 和 2.5~3 mm/min 变化范围土壤累积入渗量增幅较大,表明降雨强度对土壤累积入渗量的影响存在阶段性差异。王玉宽等^[24]通过模拟降雨试验分析,认为土壤入渗率随单位降雨总动能的增加呈线性增加趋势,降雨强度对土壤入渗的影响存在阶段性变化,与文中的研究结论基本一致。

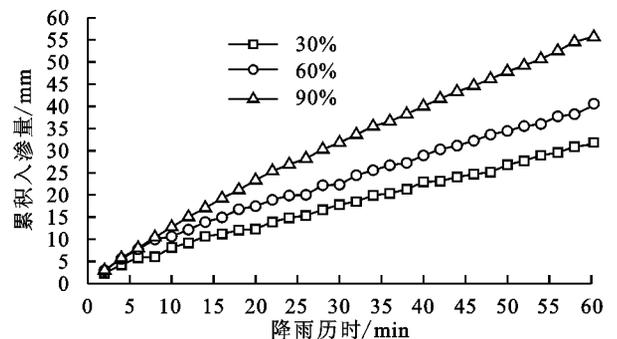


图 3 不同覆盖度下土壤累积入渗量变化过程

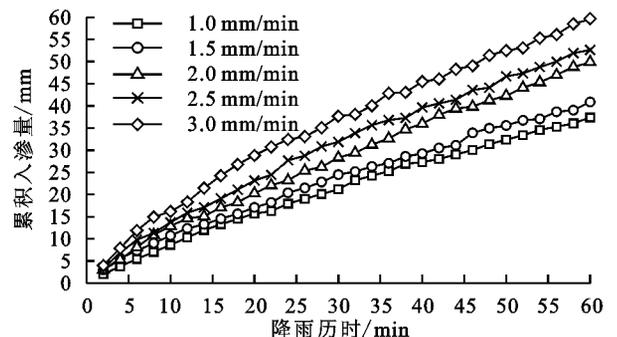


图 4 不同降雨强度下土壤累积入渗量变化过程

3.3 土壤入渗系数对草被覆盖度和降雨强度的响应

土壤入渗系数定义为土壤入渗率与降雨强度的比值,表示单位降雨时间内土壤入渗量占降雨量的比例。从图 5 和图 6 可以看出,在不同草被覆盖度和不同降雨强度下,随降雨的持续土壤入渗系数均呈不断下降的趋势,土壤入渗系数初始减少较快,随后不断变缓趋于稳定。表明随降雨的持续,土壤入渗量占总降雨量的比例不断降低。

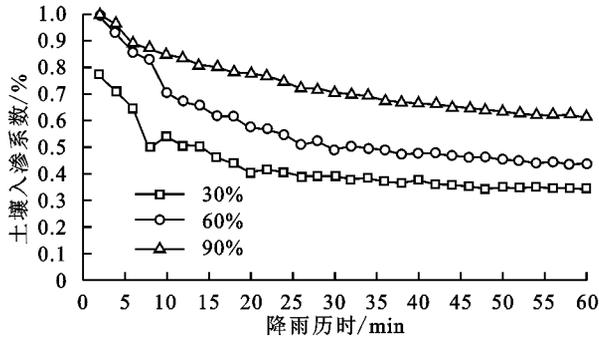


图 5 不同覆盖度下土壤入渗系数变化过程

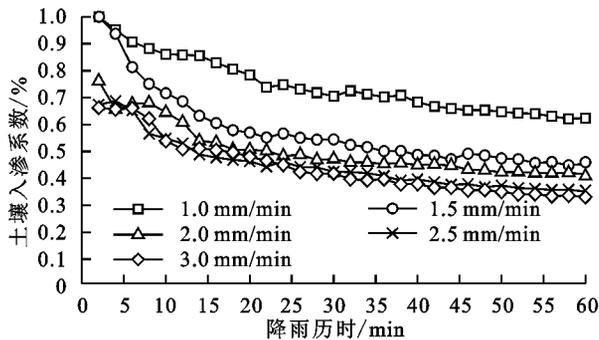


图 6 不同降雨强度下土壤入渗系数变化过程

图 5 表明,土壤入渗系数随着草被覆盖度的增加而增加,30%,60%,90%草被覆盖度下土壤入渗系数的变化依次为 0.35~0.78,0.44~1,0.62~1,表明在 1.5 mm/min 降雨强度下,入渗量达到了降雨量的 35%;不同草被覆盖度下,最小入渗系数由 0.35 增加到 0.62,表明草被覆盖度的增加能明显提高土壤入渗系数,这充分显示了植被增加土壤入渗、涵养水源的效益。

从图 6 可以看出,随降雨强度的增大,土壤入渗系数不断减小,表明大雨强能降低土壤入渗量占总降雨量的比例。降雨过程中,1 mm/min 降雨强度下土壤入渗系数明显高于 1.5~3 mm/min 降雨强度下的入渗系数,而在 1.5~3 mm/min 降雨强度范围内,土壤入渗系数之间差异不明显,表明自然草被坡面增加土壤入渗的有效降雨强度为 1~1.5 mm/min。

3.4 不同入渗模型对土壤入渗率的适用性

利用 4 种入渗模型对不同草被覆盖度和降雨强度下土壤入渗过程进行模拟,结果见表 3 和表 4。比较 4 种入渗模型拟合结果发现,对于该区域土壤的入渗,不同草被覆盖度和降雨强度下降雨入渗随时间变化的过程可以用同一种曲线进行模拟;不同草被覆盖度下,Koçtakob、Horton、Philip、通用公式 R^2 的平均值分别为 0.841 3,0.940 1,0.866 7,0.901 4,不同降雨强度下,Koçtakob、Horton、Philip、通用公式 R^2 的平均值分别为 0.891 1,0.933 7,0.880 3,0.897 6,表明 4 种入渗公式均能很好的模拟该区域土壤的入渗过程,其中 Horton 模型的拟合效果较好。

表 3 不同草被覆盖度土壤入渗模型参数拟合

覆盖度/ %	Koçtakob			Horton				Philip			经验通用公式			
	a	b	R^2	f_0	f_c	k	R^2	f_c	s	R^2	a_1	b_1	c	R^2
30	1.07	-0.24	0.7192	1.50	0.46	0.27	0.9364	0.30	1.89	0.8106	1.34	-1.05	0.43	0.8854
60	1.50	-0.27	0.8955	1.48	0.55	0.13	0.9603	0.35	2.72	0.9104	1.36	-0.43	0.36	0.9105
90	1.79	-0.22	0.9093	1.61	0.77	0.09	0.9237	0.58	2.96	0.8821	1.79	-0.89	0.00	0.9093

由表 3 和表 4 还可看出,不同草被覆盖度和降雨强度下,土壤入渗参数均发生了明显变化。Horton 公式中 k 值越大,表示 f_0 衰减到 f_c 所需的时间越短,Philip 公式中 s 值越大,表示土壤吸水能力越强。表 3 中 k 值随着草被覆盖度的增大逐渐减小,表明草被覆盖度的增加能延缓土壤入渗率的衰减,即草被覆盖度越大,土壤入渗率减小的越慢; s 值随着草被

覆盖度的增大逐渐增加,表明草被覆盖能增大土壤的吸水能力,即草被覆盖度越大,土壤吸水能力越强。表 4 中 k 值随降雨强度的增大呈随机变化,表明降雨强度对土壤入渗速率的衰减作用不明显; s 值随降雨强度的增大逐渐增加,且降雨强度越大, s 值增加越明显,表明降雨强度能增大土壤吸水能力,降雨强度越大,效果越明显。

表 4 不同降雨强度下土壤入渗模型参数拟合

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	Koçtakob			Horton				Philip			经验通用公式			
	a	b	R^2	f_0	f_c	k	R^2	f_c	s	R^2	a_1	b_1	c	R^2
1	1.40	-0.28	0.8895	1.38	0.50	0.12	0.9347	0.30	2.74	0.9036	1.37	-0.45	0.23	0.9043
1.5	1.53	-0.27	0.8399	1.43	0.56	0.12	0.8792	0.36	2.76	0.8387	1.39	-0.38	0.23	0.8436
2	1.64	-0.23	0.8552	1.63	0.71	0.13	0.9105	0.50	2.76	0.8682	1.38	-0.44	0.45	0.8694
2.5	2.01	-0.28	0.9457	1.65	0.64	0.07	0.9763	0.45	3.67	0.9035	2.01	-0.28	0.00	0.9452
3	2.59	-0.32	0.9254	2.09	0.68	0.08	0.9696	0.41	4.50	0.8884	2.59	-0.32	0.00	0.9257

4 结论

(1)不同草被覆盖度下,土壤入渗率在 0.4~1.5 mm/min 范围内变化,90%草被覆盖度下土壤稳定入渗率为 0.78 mm/min,是 60%草被覆盖度的 1.38 倍,是 30%草被覆盖度的 1.68 倍;草被覆盖度由 30%增加到 90%,最小土壤入渗系数由 0.35 增加到了 0.62。

(2)在 1~2 mm/min 雨强变化范围内,土壤的稳定入渗率随雨强的增加而增大。当雨强 > 2 mm/min 时,增大雨强对土壤稳定入渗率的影响不明显;雨强对土壤累积入渗量的影响存在阶段性差异。

(3)草被覆盖度和降雨强度对土壤入渗存在交互性影响,自然草被覆盖度(60%)下,草被增加土壤入渗系数的有效雨强为 1~1.5 mm/min。

(4)不同覆盖度和雨强条件下,Horton 公式能较好的模拟该区土壤入渗过程。拟合结果表明草被覆盖度能增大土壤吸水能力和延缓土壤入渗率的衰减;降雨强度对延缓土壤入渗率衰减的作用不明显。

降雨—植被—土壤之间存在复杂的耦合作用关系,本文利用野外模拟降雨试验对野外草被坡面土壤入渗过程变化规律进行了探讨,还有待结合更多的试验观测,进一步揭示土壤入渗过程对不同下垫面条件的响应机制。

参考文献:

[1] 彭海英,童绍玉,李小雁. 内蒙古典型草原土壤及其水文过程对灌丛化的响应[J]. 自然资源学报,2017,32(4): 642-653.

[2] 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.

[3] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(1):74-80.

[4] 刘营营,余冬立,刘冬冬,等. 土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(5):84-89.

[5] Neris J, Jiménez C, Fuentes J, et al. Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain)[J]. *Catena*,2012,98(6):55-62.

[6] 莫斌,陈晓燕,杨以翠,等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 水土保持研究,2016,23(1):13-17.

[7] Fravolini A, Hultine K R, Brugnoli E, et al. Precipita-

tion pulse use by an invasive woody legume: The role of soil texture and pulse size[J]. *Oecologia*,2005,144(4): 618-627.

- [8] 姚文艺,肖培青,申震洲,等. 坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系[J]. 水利学报,2011,42(12): 1438-1444.
- [9] 肖培青,姚文艺,申震洲,等. 草被覆盖下坡面径流入渗过程及水力学参数特征试验研究[J]. 水土保持学报,2009,23(4):50-53.
- [10] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J]. 水土保持学报,2005,19(2):5-8.
- [11] 吴希媛,张丽萍. 降水再分配受雨强、坡度、覆盖度影响的机理研究[J]. 水土保持研究,2006,20(4):28-30.
- [12] 李毅,邵明安. 人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(3):18-23.
- [13] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [14] 王则雨,蒙仲举,崔向新,等. 希拉穆仁天然草地不同群落土壤入渗特征[J]. 水土保持学报,2017,31(3):112-117.
- [15] 吴庆华,张家发,蔺文静,等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J]. 农业工程学报,2014,30(7):82-90.
- [16] 牛健植,余新晓,张志强. 优先流研究现状及发展趋势[J]. 生态学报,2006,26(1):231-243.
- [17] Bogner C, Gaul D, Kolb A, et al. Investigating flow mechanisms in a forest soil by mixed-effects modeling[J]. *European Journal of Soil Science*,2010,61(6): 1079-1090.
- [18] 郝春红,潘英华,陈曦,等. 坡度、雨强对壤土入渗特征的影响研究[J]. 土壤通报,2011,42(5):1040-1044.
- [19] 郭会荣. 优先流影响下的入渗补给过程及溶质运移试验与模拟[D]. 武汉:中国地质大学,2008.
- [20] 吴庆华,朱国胜,崔皓东,等. 降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J]. 农业工程学报,2014,30(20): 118-127.
- [21] 孙美佳,余新晓,樊登星. 模拟降雨条件下黑麦草对土壤水分入渗的影响[J]. 土壤,2014,46(6):1115-1120.
- [22] 肖培青,姚文艺,李莉,等. 植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J]. 泥沙研究,2013(3):1-5.
- [23] 张晓艳,周正朝. 黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展[J]. 草业科学,2015,32(1):64-70.
- [24] 王玉宽,王占礼,周佩华. 黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析[J]. 水土保持学报,1991,5(2):25-31.