

# 黄土丘陵区不同坡度撂荒草地入渗特征影响因素试验研究

肖婧<sup>1,3</sup>, 王兵<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西杨凌712100;

2.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌712100;3.中国科学院大学,北京100049)

**摘要:**降雨特征和坡度是影响土壤入渗过程的重要因素,在植被恢复过程中,其对土壤入渗特征的影响可能会有所不同。选取黄土丘陵区6个坡度( $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ 和 $30^\circ$ )的撂荒草地(2年)径流小区( $5\text{ m} \times 20\text{ m}$ ),观测自然降雨条件下(共计34场降雨,产流11场)植被生长旺季(7—9月)土壤入渗特征,研究降雨过程参数(降雨量、平均雨强、降雨历时和 $I_{30}$ )、坡度和植被盖度对坡面入渗特征的影响。结果表明:(1)11场产流降雨不同坡度土壤入渗量总体变化范围为 $6.58\sim70.91\text{ mm}$ ,入渗补给系数为 $0.83\sim1.00$ ,入渗率为 $0.22\sim19.35\text{ mm/h}$ ;(2)土壤入渗量随降雨量呈线性增加( $R^2=0.99, p<0.01$ ),入渗补给系数随 $I_{30}$ 呈指数降低( $R^2=0.91, p<0.01$ ),平均入渗率随降雨强度呈线性增加( $R^2=0.71, p<0.01$ ),随降雨历时呈幂函数降低( $R^2=0.99, p<0.05$ );(3)坡度增大使得径流位移增长,导致入渗量、入渗补给系数和平均入渗率整体随坡度增大而呈幂函数增加,但当坡度 $>25^\circ$ 时,因径流势能沿坡面方向分量增加,径流流速加快,上述入渗特征参数略有降低;(4)由于降雨量在植被生长周期内呈下降趋势,很大程度上导致植被对入渗特征的影响受控于降雨量,土壤入渗量表现出随着植被盖度的增加呈幂函数显著下降的趋势。总体而言,降雨特征和坡度是影响土壤入渗的主要因素,且土壤入渗特征参数可表示为降雨过程参数和坡度的综合幂函数方程;在入渗补给系数较高的情况下,植被覆盖对土壤入渗特征的影响减弱。研究结果对于坡面尺度降雨径流调控机制和生态水文过程研究具有重要意义。

**关键词:**雨强;草地盖度;坡度;土壤入渗

中图分类号:S152.7 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2019)06-0136-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.019

## Experimental Study on the Influence Factors of Infiltration Characteristics of Abandoned Grassland with Different Slope Gradients in Loess Hilly Region

XIAO Jing<sup>1,3</sup>, WANG Bing<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education and Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** Rainfall characteristics and slope gradients are important factors that affect soil infiltration process, and their effects on soil infiltration characteristics may be different during the process of vegetation restoration. To discuss the effects of rainfall process parameters (rainfall, mean rainfall intensity, rainfall duration and  $I_{30}$ ), inclination of slopes and vegetation coverage on the infiltration characteristics, six runoff plots of two-years abandoned grassland with the slope gradients of  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ , and  $30^\circ$  were selected in the hilly region of the Loess Plateau, and their soil infiltration characteristics were observed in the peak period of vegetation growth (July to September) under natural rainfall (34 rainfall event and 11 rainfall-generated runoff). The results indicated that: (1) For the 11 runoff-producing rainfall under different slope gradients, the variations of soil infiltration amount was ranged from 6.58 to 70.91 mm, the infiltration supplement coefficient was ranged from 0.83 to 1.00, and the infiltration rate was ranged from 0.22 to 19.35 mm/h; (2) The amount of soil infiltration increased linearly with rainfall capacity ( $R^2 = 0.99, p < 0.01$ ) and the infiltration supplement coefficient decreased exponentially with  $I_{30}$  ( $R^2 = 0.91, p < 0.01$ ). While for the

收稿日期:2019-05-22

资助项目:国家自然科学基金面上项目“基于RUSLE模型的黄土高原草地植被覆盖因子(41771555);国家自然科学基金重点项目“退耕驱动近地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制”(41530858);国家重点研发计划项目“黄河流域生态系统变化的水资源效应与作用机理”(2016YFC0501603);国家重点研发计划项目“黄土丘陵沟壑区植被功能提升与山地果园管理关键技术及示范”(2016YFC0501703)

第一作者:肖婧(1994—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:xiaojing17@mails.ucas.ac.cn

通信作者:王兵(1982—),男,博士,副研究员,主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail:bwang@ms.iswc.ac.cn

average infiltration rate, it was increased linearly with rainfall intensity ( $R^2=0.71$ ,  $p<0.01$ ) and decreased exponentially with rainfall duration ( $R^2=0.99$ ,  $p<0.05$ ); (3) The increase in slope gradient extended the runoff displacement, resulting in the exponential increase in the infiltration volume, the infiltration supplement coefficient, and the average infiltration rate. However, when the slope gradient exceeded  $25^\circ$ , the component of runoff potential energy increased along the slope direction, the runoff velocity speeds up, and the above-mentioned infiltration characteristic parameters decrease slightly. (4) The amount of rainfall showed a downward trend during vegetation growth cycle, which to some largely extent manipulated the influence of vegetation on the infiltration characteristics, so the infiltration amount decreased significantly with the vegetation coverage. In general, rainfall characteristics and slope gradients are the main factors affecting soil infiltration, and soil infiltration characteristic parameters can be expressed as the comprehensive power function equation of rainfall process parameters and slope gradients. The effect of vegetation coverage on soil infiltration characteristics was weakened as the infiltration supplement coefficient was high. This study is of great significance for the research of rainfall-runoff regulation mechanism and eco-hydrological process at slope scale.

**Keywords:** rainfall intensity; grassland coverage; slope gradient; soil infiltration

降雨入渗是土壤水循环的重要环节,涉及到地表径流、降雨补给、溶质迁移及土壤水分再分配等诸多方面<sup>[1-3]</sup>,其中土壤入渗能力是反映土壤涵养水源和抗侵蚀能力的重要指标,受降雨<sup>[4]</sup>、植被<sup>[5-7]</sup>、土壤<sup>[8]</sup>、地形<sup>[9-10]</sup>和人类活动<sup>[11-13]</sup>的显著影响。研究土壤入渗对于土壤水分运动、溶质迁移、水土保持、降雨径流调控、地表和地下水资源合理评价与管理等方面具有重要科学意义<sup>[14]</sup>。降雨入渗和产流的关系通常由降雨特征和下垫面条件共同决定。土壤性质与入渗性能密切相关,通常土壤黏粒含量越高,导致土壤孔隙及连通性变差,土壤入渗性能随之降低<sup>[15-16]</sup>。而前期含水率变化导致土壤基质势改变,影响土壤渗透特性。降雨强度和降雨量作为反映降雨特征的2个重要指标,均对土壤入渗产生重要影响。大量室内和野外人工模拟降雨试验研究<sup>[14,17]</sup>表明,土壤平均和稳定入渗率随降雨强度增加而增大。也有部分研究<sup>[18-19]</sup>表明,雨强过大破坏土壤表层物理结构或产生大量物理结皮,从而导致土壤入渗性能变差<sup>[18-19]</sup>。一般而言,当其他条件相同时,次降雨量越大,土壤含水率增幅越大,影响土层深度越大,但随土层深度增加,增幅减小,时间上也存在滞后性<sup>[20]</sup>。植被冠层能削减雨滴对表土打击作用,这对于提高土壤入渗性能具有重要意义<sup>[21-22]</sup>。坡度也是影响土壤入渗的重要因素之一,通常认为土壤入性能随坡度的增加而降低<sup>[23]</sup>。但受降雨特征、植被覆盖和土壤性状等因素的综合影响,土壤入渗随坡度的变化较为复杂,目前尚无一致结论。如傅斌等<sup>[24]</sup>通过人工模拟降雨试验,发现稳定入渗率随坡度增加表现出增—减—增的变化趋势;Fox等<sup>[25]</sup>研究了细沟间入渗率与坡度的关系,研究结果表明入渗率随坡度增加而降低;Morbidelli等<sup>[26]</sup>基于Green-Ampt模型建立的累积入渗

率和坡度方程表明入渗率随坡度增加而递增。

目前有关降雨入渗过程的研究多采用室内人工模拟降雨试验,研究尺度较小,且在自然降雨和自然植被覆盖条件下土壤入渗特征研究相对缺乏。因此,本研究选取黄土高原丘陵区不同坡度草地小区,研究自然降雨条件下降雨特征、坡度和植被覆盖对坡面土壤入渗的影响机制,量化土壤入渗特征参数与降雨量、平均雨强、降雨历时、最大30 min雨强( $I_{30}$ )、坡度和植被盖度的相互关系,构建基于降雨过程参数、坡度和植被盖度的土壤入渗特征预测方程,以期为黄土高原干旱半干旱地区生态水文过程和水土保持相关研究提供参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验小区布设在陕西省安塞区中国科学院安塞水土保持综合试验站。安塞站( $36^\circ 30'—37^\circ 19'N$ ,  $108^\circ 05'—109^\circ 26'E$ )位于黄土高原腹地,属温带大陆性半干旱季风气候,冬冷夏热,干湿分明,为典型的森林草原过渡带。全区年均气温 $8.8\sim10.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,年日照时间2 395.6 h,日照百分率达54%,年均降水量约500 mm,且集中于7—9月,占全年降雨量的60%以上,径流量占全年的99%以上。土壤为黄绵土,结构疏松,通气透水性良好。区内因退耕还林还草政策的实施,分布大量人工植被和自然恢复植被,代表性乔木主要以刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)为主,灌丛主要有柠条(*Caragana intermedia* Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)等人工灌丛及封禁后形成的狼牙刺(*Sophora davidii* kom.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)等天然灌丛,草本植物主要包括白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (Linn.) Keng.)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii* Trin.)、长芒草(*Stipa bungeane* Trin.)等。

## 1.2 研究方法

试验于 2018 年 7—9 月进行,为该区植被生长旺季和雨季。共选取了具有相同坡向的 6 个坡度( $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  和  $30^\circ$ )的径流小区( $5\text{ m} \times 20\text{ m}$ )观测其土壤入渗特征。小区坡向为北偏东  $25^\circ$ , 海拔  $1068\sim1096\text{ m}$ ;所有小区均为撂荒 2 年的自然草地,植被特征相似且均一,优势群落为茵陈蒿群落,伴有早熟禾、杠柳、芦苇等;土壤类型为黄绵土,土壤容重为  $1.04\sim1.14\text{ g/cm}^3$ ,饱和导水率为  $0.74\sim0.93\text{ mm/min}$ ,总孔隙度为  $50\%\sim55\%$ ,其中毛管孔隙度和非毛管孔隙度各占  $46\%$  和  $6\%$ 。

**1.2.1 降雨过程观测** 试验期间径流小区的降雨特征用 S-RGA-M002 翻斗式雨量计记录,据此计算所有降雨事件的降雨量( $6.71\sim71.78\text{ mm}$ )、降雨历时( $0.67\sim51.33\text{ h}$ )、平均雨强( $0.22\sim19.51\text{ mm/h}$ )和  $I_{30}$ ( $0.81\sim26.59$ )等指标。试验期间共降雨 34 场,其中 11 场产流,23 场未产流而全部入渗(表 1)。同时,每次降雨后,地表径流量通过集流桶和分流桶水位计算得到。

表 1 降雨监测数据统计

降雨时间 (年-月-日)	降雨量/ mm	$I_{30}$	平均雨强/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	降雨 历时/h
2018-07-07	21.77	4.01	0.69	31.62
2018-07-10	71.78	7.57	6.43	11.17
2018-07-22	41.20	0.97	1.54	26.83
2018-08-10	33.02	26.59	5.35	6.17
2018-08-21	22.86	2.59	0.85	27.00
2018-08-31	29.92	12.57	1.30	23.00
2018-09-01	17.63	10.39	3.65	4.83
2018-09-11	13.00	12.40	19.51	0.67
2018-09-14	6.88	2.01	0.31	22.50
2018-09-19	11.18	1.02	0.22	51.33
2018-09-25	6.71	0.81	0.69	9.67

**1.2.2 植被特征调查** 在试验观测期内,依据小区内植被整体长势,在上、中、下 3 个坡位分别采用  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  样方框调查不同坡度径流小区植被特征。所有小区同期植被特征较为接近,在生长期,株密度变化范围为  $8.5\sim14.5\text{ 株/m}^2$ ,株高为  $69\sim86\text{ cm}$ ,基径为  $2.36\sim5.47\text{ mm}$ 。考虑到植物生物量测定会对径流小区产生扰动,于雨季试验结束后以烘干法进行测定,其中地上和地下生物量变化范围分别为  $230.21\sim737.17\text{, }31.34\sim89.55\text{ g/m}^2$ 。植被盖度采用无人机拍摄,借助 PCOVER 软件进行提取;各坡度小区植被盖度差异不显著,但随时间推移整体呈增加趋势(图 1)。

**1.2.3 土壤入渗特征参数计算** 通常植被截留量在降雨初期较大,但随降雨历时延长逐渐减小,同时

本试验中各小区植被盖度接近,相互之间差别较小,因此可取为常数。李毅等<sup>[21]</sup>在研究坡面植被对径流和入渗影响试验中,建立了单位面积草的重量( $D$ )与其截留水量( $S$ )之间的线性关系: $S=CD$ ,系数  $C$  为 0.7。本文引用该结果,通过草被地上生物量计算其截留水量。

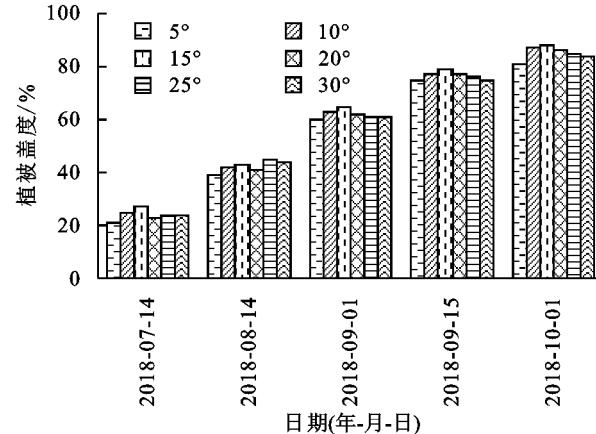


图 1 植被盖度随时间和坡度的变化

降雨过程中土壤蒸发和填凹下渗水量相对较小忽略不计。因此根据水量平衡原理,次降雨土壤入渗量计算公式<sup>[14]</sup>为:

$$F = P - R - V \quad (1)$$

式中:  $F$  为次降雨入渗量( $\text{mm}$ );  $P$  为次降雨量( $\text{mm}$ );  $R$  为次降雨坡面径流深( $\text{mm}$ );  $V$  为次降雨植被截留量( $\text{mm}$ )。

入渗补给系数主要反映降水向土壤水转化的比例,即降雨入渗的效率<sup>[21]</sup>,是各影响因素对降雨入渗结果的综合反映,为次降雨入渗量与降雨量的比值<sup>[21]</sup>:

$$SC = \frac{F}{P} \quad (2)$$

式中:  $SC$  为入渗补给系数。

平均入渗率反映了整个降雨过程土壤入渗速率的一般水平,为入渗总量与降雨历时的比值<sup>[14]</sup>:

$$M = \frac{P - R - V}{T} \quad (3)$$

式中:  $M$  为平均入渗率( $\text{mm/h}$ );  $T$  为降雨历时( $\text{h}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨入渗特征变化

降雨作为土壤水分入渗的物质来源和入渗过程的驱动因素之一,是土壤水分入渗过程的重要控制因素<sup>[15]</sup>。对于观测的 34 场降雨,其中 23 场降雨在所有坡度条件下均没有产生径流,所有坡度小区入渗量等于降雨量,入渗补给系数为 1,平均入渗速率变化范围为  $0.04\sim16.76\text{ mm/h}$ ,另外,11 场降雨产生径流,不同坡度小区入渗量总体变化范围为  $6.58\sim70.91\text{ mm}$ ,入渗补给系数为  $0.83\sim1.00$ ,入渗率为  $0.22\sim19.35\text{ mm/h}$ 。

(图 2)。对于这 11 场产流降雨,其中 1 场降雨(降雨量 6.88 mm)在坡度  $\geq 25^\circ$  时没有产生径流;其余 10 场降雨所有坡度条件下均有产流,且入渗量、入渗补给系数和平均入渗率最大时对应的降雨量分别为 71.78, 22.86, 13.00 mm。

此外,11 场产流降雨中最小降雨量为 6.71 mm,

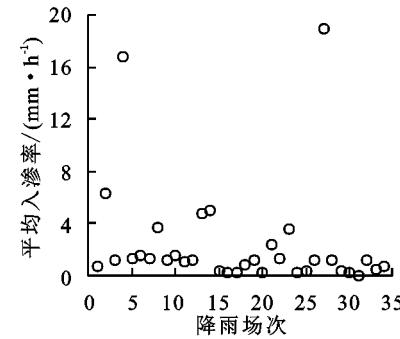
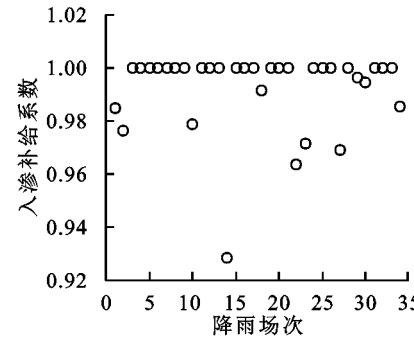
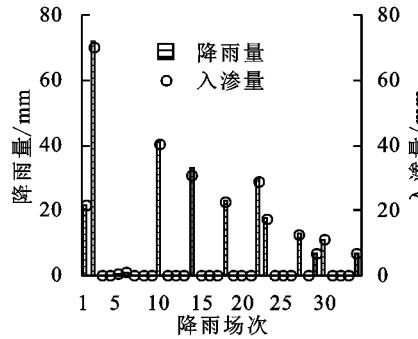
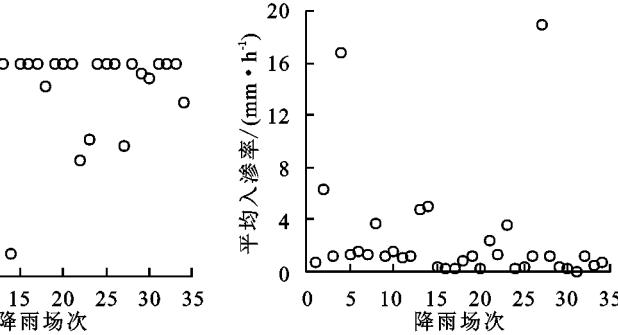


图 2 单场降雨中的入渗特征变化

## 2.2 降雨过程参数对坡面入渗特征的影响

在降雨过程中,入渗特征取通常决于外部来水量,因此降雨量、雨强等都是影响入渗特征的关键因素(表 2)。对于所选的 11 场产流降雨,入渗量与降雨量呈极显著正相关( $R^2=0.99, p<0.01$ ),随着降雨量的增大入渗量显著增加,可表示为降雨量的线性函数。入渗补给系数与  $I_{30}$  呈极显著负相关( $R^2=0.91, p<0.01$ ),随着  $I_{30}$  的增大入渗补给系数显著减少,可表示为  $I_{30}$  的指数函数。平均入渗率与降雨强度呈极显著正相关( $R^2=0.99, p<0.01$ ),随着降雨强度的增大而线性增加;与降雨历时呈显著负相关( $R^2=0.71, p<0.05$ ),随降雨历时的延长呈幂函数降低(图 3)。在降雨过程中,雨滴打击作用所产生的挤压力可以加速入渗水流的运动速度,也可以使部分静止的毛管水加入到入渗水流之中<sup>[15]</sup>,从而增强土壤入渗性能。本研究中,入渗量仅与降雨量显著正相关,这主要是由于降雨量的增大为土壤入渗提供了更多的降水,从而导致入渗量增加。研究区土壤类型为黄绵土,土壤孔隙度虽然较大,但大多数都属于毛管孔隙,雨滴击溅后孔隙容易堵塞从而发生超渗产流;当降雨强度高于土壤入渗速率时,坡面开始产流,部分降雨随坡面流失,且随着雨强的增大,降雨对坡面土壤产生的打击和溅蚀作用增强,地表容易形成物理结皮<sup>[27]</sup>,产流系数增大,入渗补给系数降低。平均入渗率是单位时间内土壤入渗量的表征,随着降雨历时的延长,入渗速率减小;而随着降雨强度的增大,单位时间内降雨量增多,平均入渗率则增加。此外,降雨历时的延长也会在一定程度上使入渗量和入渗补给系数增加,而本研究中入渗量和入渗补给系数与降雨历时并没有显著关系,这也在很大程度上表明入渗特征的变化是

而对于 23 场未产流的降雨,有 2 场降雨的降雨量(10.85, 22.15 mm)大于 6.71 mm,但并未产流,这也在一定程度说明坡面入渗量、入渗补给系数及平均入渗率等入渗特征的变化不仅受降雨量影响,可能还受降雨历时、平均雨强、 $I_{30}$ 、坡度和植被盖度等因素的综合影响。



降雨过程参数众多因素综合作用的结果。

表 2 降雨量、 $I_{30}$ 、平均雨强、降雨历时与入渗特征参数之间的相关性

入渗特征参数	降雨量	$I_{30}$	平均雨强	降雨历时
入渗量	0.999 **	0.195	0.074	0.129
入渗补给系数	-0.280	-0.953 **	-0.347	0.485
平均入渗率	0.080	0.432	0.999 **	-0.610 *

注: \* \* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

## 2.3 坡度对坡面入渗特征的影响

除降雨特征以外,坡度差异也可显著影响水分入渗特征,但就两者之间的定量关系目前尚未得出一致结论<sup>[26]</sup>。从图 4 可以看出,入渗量、入渗补给系数和平均入渗率整体随坡度增加而增大,可表示为幂函数正相关,决定系数  $R^2$  均在 0.93 以上。这主要是由于 6 个坡度小区投影面积相等( $100 \text{ m}^2$ ),随着坡度的增大,地表径流位移增长,其流经坡面的时间增加,导致入渗量和入渗补给系数增大;对于同一场降雨,6 个坡度小区降雨历时相同,入渗量的增大必然导致入渗率的增加。Janeau 等<sup>[28]</sup>通过研究不同坡度( $9^\circ \sim 32^\circ$ )条件下坡耕地土壤入渗性能差异,结果表明土壤入渗率随坡度的增加而增大;黄俊等<sup>[14]</sup>研究结果表明,随着坡度增加,稳定入渗率显著增加,但在  $10^\circ$  左右存在 1 个临界坡度,当坡度大于此值时,稳定入渗率有所降低并趋于稳定。在本研究中,当坡度  $> 25^\circ$  时,入渗量、入渗补给系数和入渗速率均相对  $25^\circ$  坡面略有降低,分别减少 3.50%, 3.28% 和 0.01%。这主要是由于对于同一场降雨而言,随着坡度的增大,径流势能在坡面方向分量增大,导致径流流速增加,入渗量减小,入渗补给系数降低,入渗率变小。

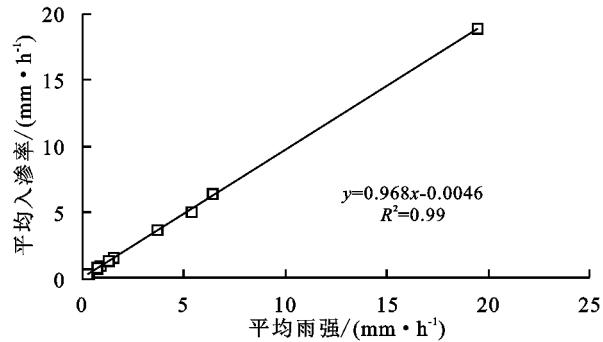
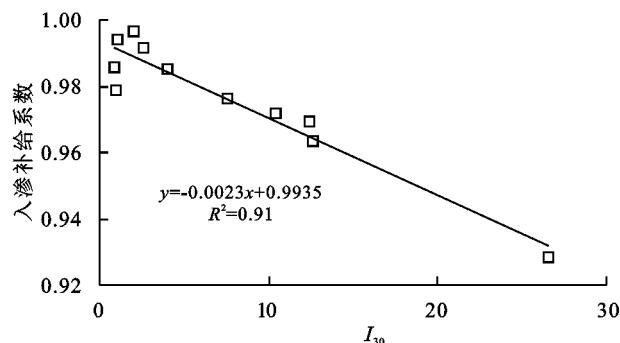
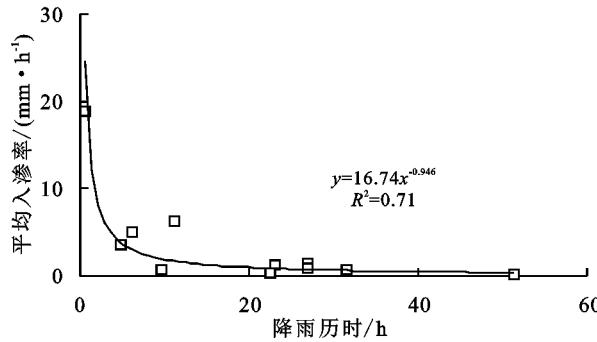
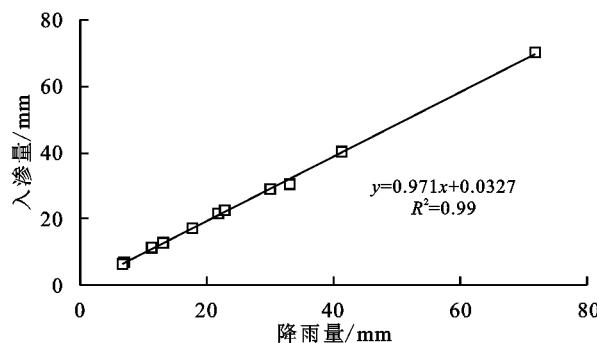


图 3 入渗量、入渗补给系数和平均入渗率随降雨特征的变化

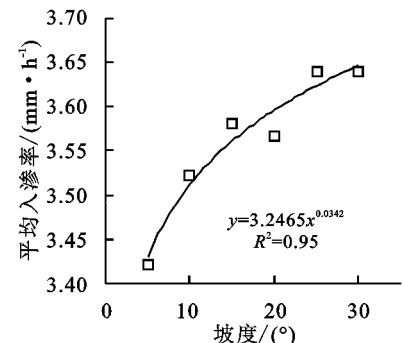
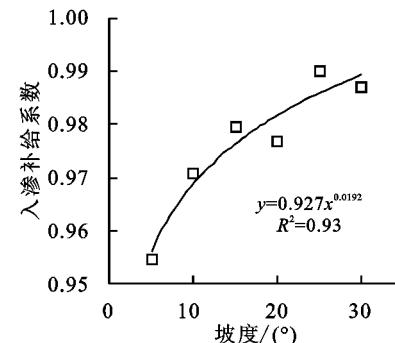
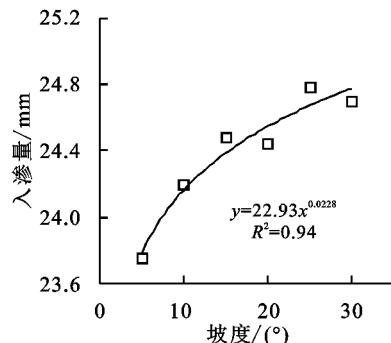


图 4 入渗量、入渗补给系数和平均入渗率随坡度的变化

## 2.4 植被覆盖对坡面入渗特征的影响

植被覆盖也可显著影响坡面入渗特征。一般而言,植被覆盖可拦蓄降雨,削减雨滴动能,抑制物理结皮发育,增加土壤入渗能力;植物生长过程也可改善土壤结构,增加土壤孔隙,从而增强土壤入渗能力<sup>[14,29-31]</sup>。本研究中,土壤入渗量随着植被盖度的增加而显著下降,且两者表现为幂函数相关( $R^2=0.73$ ,  $p<0.01$ ),同时入渗补给系数和平均入渗速率与植被盖度并无显著关系(图 5)。这主要是因为在试验观测期内(7—9月),7,8月植被盖度总体偏低(<45%),对降雨入渗的作用有限;进入9月后,植被盖度不断增大并趋于稳定(>62%),理论上应该增强入渗性能,但由于试验期间的11场产流降雨中,降雨量较大的降雨事件均集中于7,8月,且除第1场降雨外,降雨量在植被生长周期内整体呈下降趋势,9月累积降雨量相较于7,8月分别减少58.9%和35.4%,很大程度上导致植被盖度对土壤入渗性能的影响被掩盖。因此,土壤入渗量随植被盖度增大所表现出来的下降趋势并非植被盖度对入渗量的真实影响,而是受控于降雨量

对入渗量的影响。

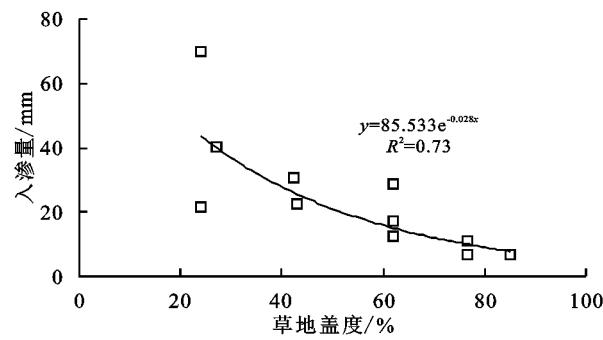


图 5 入渗量随草地盖度的变化

## 2.5 多因素影响下的入渗特征

为进一步对比分析降雨特征、坡度和植被盖度对土壤入渗性能的影响,选取试验期间11场产流降雨数据进行逐步回归分析,结果表明,入渗量可表征为降雨量、 $I_{30}$ 和坡度的非线性函数关系( $R^2=0.99$ ,  $NSE=0.99$ ,  $p<0.01$ );入渗补给系数可表征为 $I_{30}$ 和坡度的非线性函数关系( $R^2=0.67$ ,  $NSE=0.99$ ,  $p<0.01$ );而平均入渗率可表征为平均雨强、坡度和 $I_{30}$ 的非线性函数关系( $R^2=1.00$ ,  $NSE=0.99$ ,  $p<0.01$ )(表3)。

表3 各影响因素与入渗特征参数回归拟合

入渗特征参数	回归方程	决定系数 $R^2$	P 值
入渗量/mm	$F=0.955P^{0.995}I_{30-0.13}S^{0.019}$	0.99	0
入渗补给系数	$SC=0.942I_{30-0.014}S^{0.21}$	0.67	0
平均入渗率/ (mm·h <sup>-1</sup> )	$M=0.929I^{0.997}S^{0.022}I_{30-0.008}$	0.99	0

注:  $F$  为入渗量 (mm);  $SC$  为入渗补给系数;  $M$  为平均入渗率 (mm/h);  $P$  为降雨量 (mm);  $I_{30}$  为最大 30 min 雨强;  $S$  为坡度 ( $^\circ$ );  $I$  为平均雨强 (mm/h)。

总体而言,构建的土壤入渗特征综合方程拟合效果较好,土壤入渗性能主要受降雨特征和坡度影响。由于试验期间所有降雨事件的降雨量整体偏小,降雨历时绵长,平均雨强总体均较小(0.22~19.51 mm),且6个坡度小区均为撂荒初期草地(2年),土壤为黄绵土,容重较小(1.04~1.14 g/cm<sup>3</sup>),结构疏松,对水分垂直运动的拦截作用减弱,且较多的土壤孔隙也能显著提高土壤的通气性和透水性<sup>[32]</sup>,使得大部分降雨就地入渗,提高了土壤水分的入渗效率,因此入渗补给系数总体较高( $\geq 0.83$ ),在一定程度上削弱了植被对土壤入渗性能的影响。

### 3 结论

(1)降雨特征可显著影响坡面土壤入渗性能,但不同入渗特征参数的影响因素存在差异:入渗量主要受降雨量影响,随降雨量增加呈线性递增;入渗补给系数主要受  $I_{30}$  影响,随  $I_{30}$  增大呈指数减少;平均入渗率则受降雨强度和降雨历时的共同影响,随降雨强度增大呈线性增加,随降雨历时延长呈幂函数降低。

(2)土壤入渗量、入渗补给系数和平均入渗率整体随坡度增大呈线性增加,但因坡度的增大会同时导致径流位移增长和径流势能沿坡面方向分量增加,在两方面因素综合作用下,土壤入渗随坡度变化在 25° 存在临界值,当坡度<25°时,土壤入渗随坡度增加而递增,超过此坡度则减少。

(3)由于降雨量在植被生长周期内呈下降趋势,因此植被覆盖对土壤入渗特征的影响不能充分体现,使得植被对入渗特征的影响受控于降雨量,土壤入渗量表现出随植被盖度的增加呈幂函数显著下降。总体而言,降雨特征和坡度是影响土壤入渗的主要因素,土壤入渗特征参数可表示为降雨特征和坡度的多元非线性方程。

### 参考文献:

- [1] Zhao L S, Hou R, Wu F Q, et al. Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 179: 47-53.

- [2] Wang J, Shao M A. Solute transport characteristics of a deep soil profile in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(4): 628-637.
- [3] 康金林,杨洁,刘窑军,等.初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J].水土保持学报,2016,30(1):122-126.
- [4] Vaezi A R, Ahmadi M, Cerdà A. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls[J]. Science of the Total Environment, 2017, 583: 382-392.
- [5] Zheng J, Fan J L, Zhang F C, et al. Throughfall and stemflow heterogeneity under the maize canopy and its effect on soil water distribution at the row scale[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 1367-1382.
- [6] Jha M K, Mahapatra S, Mohan C, et al. Infiltration characteristics of lateritic vadose zones: Field experiments and modeling[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187: 219-234.
- [7] Dixit A K, Agrawal R K, Das S K, et al. Soil properties, crop productivity and energetics under different tillage practices in fodder sorghum + cowpea-wheat cropping system[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(4): 492-506.
- [8] Tang B Z, Jiao J Y, Yan F C, et al. Variations in soil infiltration capacity after vegetation restoration in the hilly and gully regions of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(3): 1456-1466.
- [9] Rossi M J, Ares J O, Jobbágy E G, et al. Vegetation and terrain drivers of infiltration depth along a semiarid hillslope[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 1399-1408.
- [10] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(5): 1353-1365.
- [11] Minhas P S, Qadir M, Yadav R K. Groundwater irrigation induced soil sodification and response options [J]. Agricultural Water Management, 2019, 215: 74-85.
- [12] Sosa-Quintero J, Godínez-Alvarez H. Human activities in a tropical Mexican desert: Impact of rainfed agriculture and firewood extraction on vegetation and soil[J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(5): 494-503.
- [13] Jakab G, Madarász B, Szabó J A, et al. Infiltration and soil loss changes during the growing season under ploughing and conservation tillage [J]. Sustainability, 2017, 9(10): 1726.
- [14] 黄俊,金平伟,李敏,等.径流小区尺度土壤入渗率影响因子与估算模型研究[J].农业机械学报,2016,47(8): 171-178.
- [15] 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.
- [16] 解文艳,樊贵盛.土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004,35(3):272-275.
- [17] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18,78.
- [18] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等.耕作对土壤入渗性能的影响[J].生态学报,2006,26(5):1624-1630.
- [19] Morin J, Van Winkel J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4):1223-1227.
- [20] 张常亮,李萍,李同录,等.黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].水利学报,2014,45(6):728-734.
- [21] 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.
- [22] 王国梁,刘国彬,周生路.黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J].自然资源学报,2003, 18(5):529-535.
- [23] Huang J, Wu P T, Zhao X N. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments[J]. Catena, 2013, 104:93-102.
- [24] 傅斌,王玉宽,朱波,等.紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J].农业工程学报,2008,24(7):39-43.
- [25] Fox D M, Bryan R B, Price A G. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions[J]. Geoderma, 1997, 80(1/2):181-194.
- [26] Morbidelli R, Saltalippi C, Flammini A, et al. Role of slope on infiltration: A review[J]. Journal of Hydrology, 2018, 557:878-886.
- [27] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.
- [28] Janeau J L, Briquet J P, Planchon O, et al. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand[J]. European Journal of Soil Science, 2003, 24:543-553.
- [29] Greene P B, Hairsine P B. Elementary processes of soil-water interaction and thresholds in soil surface dynamics: A review [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(9):1077-1091.
- [30] Leung A K, Boldrin D, Liang T, et al. Plant age effects on soil infiltration rate during early plant establishment[J]. Géotechnique, 2017, 68(7):646-652.
- [31] Wang L H, Ma B, Wu F Q. Effects of wheat stubble on runoff, infiltration, and erosion of farmland on the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall [J]. Solid Earth, 2017, 8(2):281-290.
- [32] 徐勤学,李春茂,陈洪松,等.喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J].农业工程学报,2018,34(8):124-131.

(上接第135页)

- [27] Xu Z X, Pang J P, Liu C M, et al. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(25):3619-3630.
- [28] Rostamian R, Jaleh A, Afyuni M, et al. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran[J]. Journal Des Sciences Hydrologiques, 2008, 53(5):977-988.
- [29] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准.SL 190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [30] Xu Y, Tang H P, Wang B J, et al. Effects of landscape patterns on soil erosion processes in a mountain-basin system in the North China[J]. Natural Hazards, 2017, 87(3):1567-1585.
- [31] Sarangi A, Madramootoo C A, Singh D K. Development of ArcGIS assisted user interface for estimation of watershed morphological parameters[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004(3/4):139-149.
- [32] 方海燕,蔡强国,李秋艳.产沙模数与流域面积关系研究进展[J].地理科学进展,2008,27(6):63-69.
- [33] 安妙颖,韩玉国,吴玉恒,等.基于KINEROS2模型的降雨和坡长因子对土壤侵蚀过程影响的研究[J].水土保持学报,2017,31(4):25-31.
- [34] 王晓康,张毓涛,张新平,等.天山中部不同林分对产流产沙影响的灰色关联分析[J].干旱区研究,2014,31(4):696-701.
- [35] Krishnaswamy J. Spatial patterns of suspended sediment yields in a humid tropical watershed in Costa Rica [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(5):1130-1131.
- [36] Schiefer E, Slaymaker O, Klinkenberg B. Physiographically controlled allometry of specific sediment yield in the Canadian Cordillera: A lake sediment-based approach[J]. Geografiska Annaler Series a Physical Geography, 2001, 83A:55-65.