

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.06.002

黄土丘陵沟壑区坡面尺度撂荒草地入渗特征影响因素试验研究

肖婧^{1,2}, 王兵^{1,3}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 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)

摘要: 为研究黄土丘陵沟壑区多种因素对撂荒草地入渗特征的影响, 采用野外自然降雨观测法, 研究不同降雨特征(降雨量、平均雨强、降雨历时和最大30 min雨强(I_{30}))、土壤前期含水量、坡长(10 m、20 m、30 m、40 m和50 m)和植被盖度条件下土壤入渗特征差异, 通过灰色关联度法判断影响撂荒草地入渗特征的主导因子。结果表明: ①入渗量随降雨量、降雨历时和 I_{30} 增加而增大($R^2 > 0.55$, $P < 0.01$); 入渗补给系数随降雨量、 I_{30} 和平均雨强增大而减小($R^2 > 0.12$, $P < 0.05$); 平均入渗率随降雨强度、 I_{30} 增加而递增($R^2 > 0.53$, $P < 0.01$)。②入渗量和平均入渗率随前期含水量增加而减少, 入渗补给系数随之增加而增大($R^2 > 0.13$, $P < 0.05$)。③入渗量、入渗补给系数和平均入渗率总体随坡长增加而增大($R^2 > 0.56$, $P < 0.01$), 但在坡长30 m和40 m之间存在临界坡长。④在入渗率较高的情况下, 植被对土壤入渗的影响并不显著, 降雨特征和坡长成为主导因子。

关键词: 降雨特征; 草地盖度; 坡长; 土壤前期含水量; 土壤入渗; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2020)06-0820-12

土壤入渗是降雨、灌溉等水分经地表进入土壤后运移、存储变为土壤水的过程, 是自然界水循环的重要组成部分^[1-3]。研究土壤入渗对于坡面径流调控、涵养水源、保持水土、水资源评价与管理、农田面源污染防治等方面具有重要意义^[1]。近年来国内外学者对土壤入渗进行了大量研究, 主要集中在降雨^[4]、植被^[5-7]、地形^[8-9]、土壤^[10]和人类活动^[11-13]等方面对土壤入渗性能的影响。降雨量直接决定着土壤入渗物质来源的多少, 降雨历时客观上可延长水分下渗时间, 但雨强过大则可能破坏土壤表面物理结构而导致土壤入渗性能降低^[14-15]。一般而言, 单次降雨量越大、降雨历时越长, 土壤入渗量增幅越大, 影响土层越深厚^[16]。与裸地相比, 植被生长改变了雨水向土壤水转化的途径, 植被冠层能削减雨滴对表土的直接打击作用, 枯枝落叶的持水作用可延长水分入渗时间, 根系对土壤的固结及缠绕作用可改善土壤结构, 这些均有利于提高土壤入渗性能^[17-18]。土壤前期含水量变化可导致土壤团粒体积改变, 进一步使得土壤孔隙及其连通性发生变化, 从而影响土壤渗透性。通常, 前期含水率越低, 土水势越低, 对水分子的吸力更大, 土壤水分下渗更快^[19]。坡长对土壤水分入渗的影响较为复杂, 不仅可延长径流位移路径, 且随坡面承雨量和汇水面积增大, 径流势能增加, 两方面因素综合作用下, 坡长对坡面土壤入渗影响目前尚无一致结论。如黄俊等^[1]对野外人工径流场观测资料进行分析, 发现平均入渗率随坡长增加呈线性递增趋势。van de Giesen等^[20]研究了坡长与坡面产流的关系, 结果表明径流量随坡长增加而减少, 反向说明入渗量随坡长增大呈增加趋势。而Lal^[21-22]在坡耕地的试验结果却表明入渗量随坡长增加不断减小。目前土壤入渗研究多集中于室内人工模拟

收稿日期: 2019-09-28; 网络出版日期: 2020-05-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200519.1414.020.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41771555; 41530858)

作者简介: 肖婧(1994—), 女, 四川苍溪人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。

Email: xiaojing17@mailsucas.ac.cn

通信作者: 王兵, Email: bwang@ms.iswc.ac.cn

降雨或人工草地覆盖条件下的小尺度试验,针对野外自然降雨条件下撂荒草地入渗特征的研究尚存不足,需进一步研究。

本研究利用野外径流小区观测法,在研究降雨特征(降雨量、降雨历时、最大30 min雨强(I_{30})和平均雨强)、前期含水量、坡长、植被盖度与土壤入渗量、入渗补给系数和平均入渗率的定量关系基础上,用灰色关联度法进一步探讨影响土壤入渗性能的主导因子,以期为黄土丘陵沟壑区水土保持相关研究和生产实践活动提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西安塞农田生态系统国家野外科学观测研究站(即安塞水土保持综合实验站,以下简称安塞站),安塞站始建于1973年,位于陕西省延安市安塞区境内,地处黄土丘陵沟壑区中心地带($109^{\circ}19'23''E$, $36^{\circ}51'30''N$),属于黄土高原丘陵沟壑区第二副区,海拔1068~1309 m。安塞站在气候上处于暖温带半湿润半干旱过渡区,春季干旱多风,夏季炎热多雨,冬季干燥寒冷,年均气温 $8.8^{\circ}C$,年日照时数为2395.6 h,日照百分率达54%,年均降水量约500 mm,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。植被区划属于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原区,原始植被现已无存。土壤类型上处于黄绵土与沙黄土交错区,地带性土壤为黑垆土,绝大部分已流失,黄土母质广泛出露地表,主要为黄绵土,结构疏松,通气透水性良好^[23]。

区内因退耕还林(草)工程的实施,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;灌木主要有柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、狼牙刺(*Sophora viciifolia* Kom.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)等;草本植物主要包括白羊草(*Bothriochloa ischaemum* Keng.)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii* Ledeb.)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)等。

1.2 试验方法

试验于2018年7月到9月进行,为该区雨季和植被生长旺期。共选取了具有相同坡向的5个坡长(10 m, 20 m, 30 m, 40 m和50 m)径流小区,坡度均为 25° ,宽为5 m,观测土壤入渗特征。小区坡向为北偏东 25° ,海拔范围为1228~1258 m;所有小区均为撂荒2年的自然草地,撂荒之前为试验用地(所有小区始建于20世纪90年代,用于研究土壤侵蚀,之后撂荒。2015年被翻耕重建并用于研究地表糙度,2016年6月再次撂荒)。本试验所有小区均设置在同一地点、同一坡面上,除坡长以外,坡度、坡向、同期植被及降雨特征均相同,因此土壤性质可视为一致;优势群落为茵陈蒿群落(黄土丘陵沟壑区典型草地植被类型之一),伴有早熟禾、芦苇等;土壤类型为典型黄绵土,为黄土丘陵沟壑区分布面积最广的土壤类型,土层软绵,平均黏粒、粉粒和砂粒含量分别为9.8%、58.4%和31.8%,有机质含量为6.94~9.01 mg/kg,土壤容重为 $1.01\sim 1.05\text{ g/cm}^3$,饱和导水率为 $1.53\sim 2.32\text{ mm/min}$,总孔隙度为55%~57%,其中毛管孔隙度和非毛管孔隙度各占46%和11%。

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,分辨率0.2 mm,测量精度 $\pm 1\%$,时间间隔设置为10 min,据此计算所有降雨事件的降雨量、降雨历时、平均雨强和 I_{30} (表1)。期间共降雨34场,其中11场产流,23场未产流而全部入渗。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,并在40 m坡长小区采用ET100云智能土壤水分观测仪对土壤水分实施动态监测(监测深度为0~100 cm,共分10层),测量精度 $\pm 2.5\%$ 。

在观测期内,依据小区内植被整体长势,采用 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方框按上、中、下3个坡位分别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 $21.5\sim 43.5\text{ 株/m}^2$,株高为 $43.9\sim 82.7\text{ cm}$,基径为 $2.85\sim 4.33\text{ mm}$ 。植物生物量以烘干法进行测定,其中地上和地下生物量变化

表 1 降雨监测数据统计
Table 1 Statistical table of test rainfall monitoring data

日期	降雨量/ mm	I_{30} / (mm · h ⁻¹)	降雨历时/ h	平均雨强 / (mm · h ⁻¹)	日期	降雨量/ mm	I_{30} / (mm · h ⁻¹)	降雨历时/ h	平均雨强 / (mm · h ⁻¹)
2018-07-07	21.8	8.0	31.62	0.69	2018-08-21	22.9	5.2	27.00	0.85
2018-07-10	71.8	15.2	11.17	6.43	2018-08-24	0.2	1.2	0.17	1.22
2018-07-12	0.2	1.2	0.17	1.22	2018-08-25	0.6	0.4	2.33	0.26
2018-07-14	2.8	16.8	0.17	16.76	2018-08-26	1.2	1.6	0.50	2.39
2018-07-15	10.8	7.6	8.17	1.33	2018-08-31	29.9	25.2	23.00	1.30
2018-07-16	22.2	10.4	14.83	1.49	2018-09-01	17.6	20.8	4.83	3.65
2018-07-19	3.2	2.4	2.50	1.28	2018-09-02	0.4	0.4	2.17	0.19
2018-07-20	0.6	3.6	0.17	3.66	2018-09-09	1.0	0.4	3.00	0.34
2018-07-21	1.6	2.0	1.33	1.20	2018-09-10	0.2	1.2	0.17	1.22
2018-07-22	41.2	2.0	26.83	1.54	2018-09-11	13.0	24.8	0.67	19.51
2018-07-30	1.0	2.0	1.00	1.02	2018-09-12	0.2	1.2	0.17	1.22
2018-08-01	0.4	1.2	0.33	1.22	2018-09-14	6.9	4.0	22.50	0.31
2018-08-08	0.8	4.8	0.17	4.72	2018-09-19	11.2	2.0	51.33	0.22
2018-08-10	33.0	53.2	6.17	5.35	2018-09-20	0.6	0.4	16.83	0.04
2018-08-12	0.4	0.4	1.17	0.35	2018-09-21	0.2	1.2	0.17	1.22
2018-08-13	1.6	1.2	7.50	0.22	2018-09-24	1.0	1.2	2.00	0.51
2018-08-14	1.6	1.2	7.83	0.21	2018-09-25	6.7	1.6	9.67	0.69

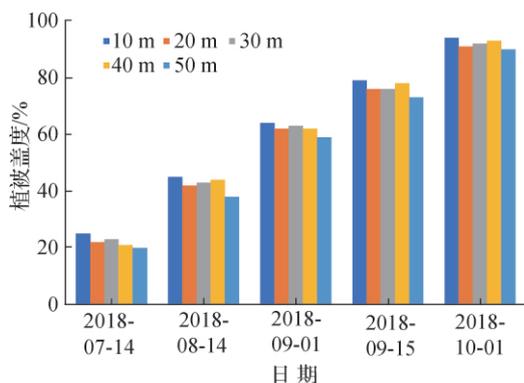


图 1 植被盖度随时间和坡长变化

Fig. 1 Variation of vegetation coverage with time and gradient

范围分别为 94.94 ~ 242.64 g/m²、78.17 ~ 114.25 g/m²。植被盖度用大疆精灵 4 Pro 无人机拍照，然后用地表植被覆盖自动计算系统 (PCOVER) 软件提取植被盖度，精度 ±1%。同期各坡度小区植被盖度差异不显著，变化范围为 20.1% ~ 94.0%，但随时间推移整体呈增加趋势 (图 1)。

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^[17]，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。熊沛枫^[24]在研究黄土丘陵区草地群落冠层降雨截留特征时，以撂荒 2 a 的草地为研究对象，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。本研究

同样选用黄土丘陵沟壑区撂荒 2 a 草地为研究对象，因此引用该结果，通过草地上生物量计算其截留水量。

降雨过程中土壤蒸发和填注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为

$$F = P - R - V \tag{1}$$

式中: F 为次降雨入渗量, mm; P 为次降雨量, mm; R 为次降雨坡面径流深, mm; V 为次降雨植被截留量, mm。

入渗补给系数主要反映降水向土壤水转化的比例关系，即降雨入渗的效率^[17]，为次降雨入渗量与降雨量的比值:

$$S_c = \frac{F}{P} \tag{2}$$

式中: S_c 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之比:

$$M = \frac{F}{T} \tag{3}$$

式中: M 为平均入渗率, mm/h; T 为降雨历时, h。

灰色关联度分析法是一种多因素统计分析方法, 以各因素的样本数据为依据用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序, 若样本数据反映出的两个因素变化的态势基本一致, 则它们之间的关联度较大; 反之, 关联度较小。在确定母因素集(参考数列)和子因素集(比较数列)并将数据量纲一化处理后, 灰色关联度系数通过以下公式计算:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_o(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_o(k) - x_i(k)|}{|x_o(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_o(k) - x_i(k)|} \tag{4}$$

式中: $\xi_i(k)$ 为关联度系数; $x_o(k)$ 为参考数列; $x_i(k)$ 为比较数列; ρ 为分辨系数, 通常取 0.5。然后计算关联度系数均值, 形成关联序。

2 结果与讨论

2.1 降雨特征分析

试验期间(2018 年 7 月初到 9 月底)共记录了 34 个降雨事件, 累积降雨量 328.9 mm, 其中 7 月、8 月和 9 月降雨量分别为 177.2 mm、92.6 mm 和 59.1 mm, 各占试验期间总降雨量的 53.87%、28.17% 和 17.96%。据安塞站长期监测数据显示, 1970—2017 年, 年均降水量和年均温分别为 497.5 mm 和 9.3 °C, 其中 7—9 月降水量的全年占比和平均气温分别为 60% 和 19.8 °C; 而 2018 年降水量和年均温分别为 497.4 mm 和 9.5 °C, 7—9 月降水量的全年占比和气温分别为 66% 和 20.2 °C。因此 2018 年 7—9 月实验观测数据与之相比, 基本处于多年平均水平。依据中国雨量分类系统^[25], 考虑到研究区降雨量总体偏小的实际情况, 将降雨量划分为 5 类: 0~5 mm, 5~15 mm, 15~30 mm, 30~50 mm 和大于 50 mm。如图 2 所示, 大部分单次降雨事件的降雨量小于 50 mm, 约占总降雨量的 78.17%。小于 5 mm 的小雨量事件发生频率最高, 约占降雨事件总数的 62.86%, 但其对总降雨量的贡献小于 6.73%。虽然仅记录了 1 次暴雨(大于 50 mm), 但其对总降雨量的贡献率达 21.83%。约 62.86% 的降雨事件的降雨历时在 5 h 之内, 而时长大于 30 h 的降雨事

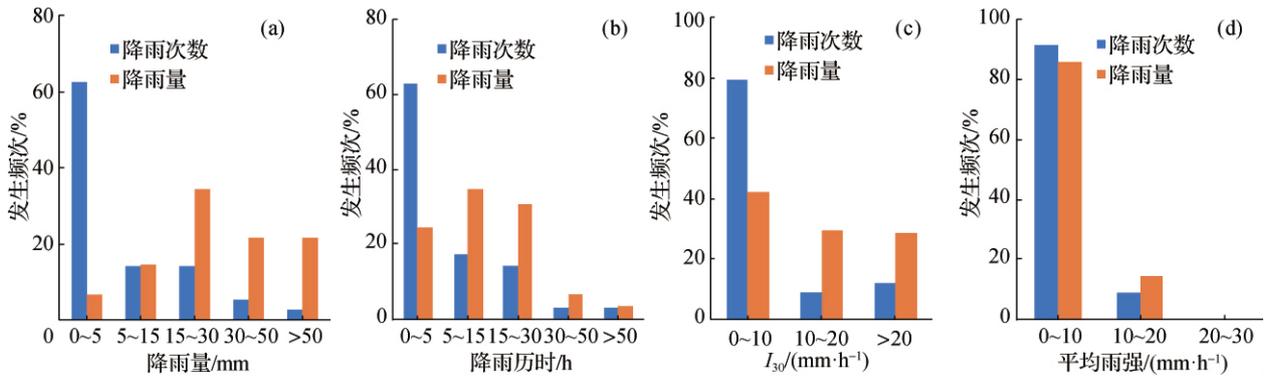


图 2 降雨特征分布

Fig. 2 Distribution of rainfall characteristics

件仅2次,两者对总降雨量的贡献率分别为24.24%和10%,而其余31.43%的降雨事件对总降雨量的贡献率达65.74%。单次降雨事件的 I_{30} 为0.4~53.2 mm/h,平均值为6.9 mm/h。88.57%以上的 I_{30} 均小于20 mm/h,约占总降雨量的72.22%。所有降雨事件的平均雨强分布情况与之类似,区别在于最大值、最小值和平均值分别为19.51 mm/h、0.04 mm/h、2.46 mm/h,90%以上的平均雨强均小于10 mm/h,约占总降雨量的85.83%。

2.2 土壤前期含水量变化

土壤前期含水量是影响水分入渗和传导的重要因子,与气温、降雨等密切相关。试验期间所有降雨事件的土壤前期含水量为7.06%~18.92%,平均前期含水量为13.30%,其中约58%记录事件的土壤前期含水量高于此值,且最大值与最小值之间存在2.68倍之差(图3)。由于大气和土壤之间通过地表不断进行着热量交换,因此,土壤温度和气温之间存在相同的递变趋势^[26]。一般而言,土壤水分蒸发随土壤温度或气温升高愈加强烈,因此,如图3所示,当气温越高时,土壤前期含水量越低,两者基本呈相反的递变趋势。最高与最低气温之间存在3.7倍之差,平均气温为19.1℃,其中约63%记录降雨事件的气温高于此值。整体而言,34个记录降雨事件中,气温与土壤前期含水量变化幅度类似,但趋势相反。

2.3 土壤水分入渗的影响因素

2.3.1 土壤入渗特征变化

在试验条件下,对于观测的34场降雨,其中仅11场降雨产流,各坡长小区入渗量变化范围为6.57~71.36 mm,入渗补给系数为0.97~1.00,平均入渗率为0.22~19.43 mm/h;另23场未产流降雨,所有降雨全部就地入渗,各坡长小区入渗量等于径流量,入渗补给系数为1.00,平均入渗率的变化范围为0.04~16.76 mm/h(图4)。此外,对于11场产流降雨,各小区入渗量、入渗补给系数和平均入渗率取得最大值时对应的降雨量分别为71.8 mm、6.9 mm和13.0 mm。这也在一定程度上表明,在次降雨尺度上,其降雨量参差不齐,未能充分反映降雨对土壤入渗的影响^[27],土壤入渗特征也需要通过降雨历时、 I_{30} 、平均雨强、坡长和植被等因素进行综合表征。

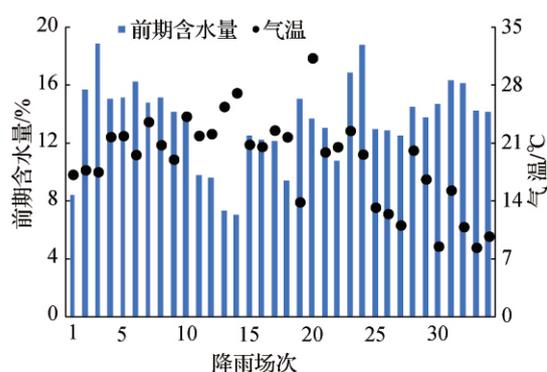


图3 单次降雨事件中土壤前期含水量和气温分布
Fig.3 Antecedent water content and air temperature during individual rainfall event

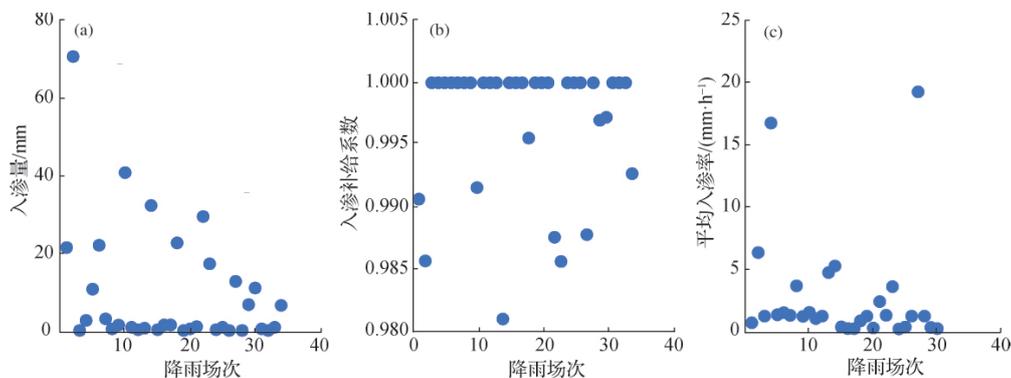


图4 单场降雨中土壤入渗特征变化

Fig.4 Variation of infiltration characteristics in per rainfall event

2.3.2 降雨特征对土壤入渗的影响

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因此,降雨特征可显著影响土壤入渗性能(表2)。对于试验期间34场降雨,入渗量与降雨量呈极显著正相关($R^2 = 0.99, P < 0.01$),随降雨量增加而线性增加;与 I_{30} 和降雨历时呈极显著幂函数正相关($R^2 = 0.55, P < 0.01$; $R^2 = 0.57, P < 0.01$),随 I_{30} 和降雨历时增加,入渗量显著增大。入渗补给系数与降雨量呈极显著负相关($R^2 = 0.59, P < 0.01$),随降雨量增大而线性减少;与 I_{30} 和平均雨强分别呈极显著对数、显著线性负相关($R^2 = 0.65, P < 0.01$; $R^2 = 0.12, P < 0.05$),随 I_{30} 和平均雨强增加,入渗补给系数显著减小。平均入渗率与平均雨强呈极显著正相关($R^2 = 0.99, P < 0.01$),随平均雨强增加而线性递增;与 I_{30} 呈显著幂函数正相关($R^2 = 0.53, P < 0.01$),随 I_{30} 增加,平均入渗率显著增大(图5)。本研究中,入渗量与降雨量、 I_{30} 、降雨历时均呈极显著正相关,这主要是因为:①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;②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,从而增强土壤入渗性能^[19];③随降雨历时的延长,水分入渗时间客观上也随之增多,因此入渗量也随之增大。入渗补给系数与降雨量、 I_{30} 呈极显著负相关,与平均雨强呈显著负相关,这主要是因为,一方面研究区土壤类型为黄绵土,土壤孔隙度虽较大,但大多属于毛管孔隙,在雨滴击溅作用下,表层细颗粒容易堵塞土壤空隙进而多发生超渗产流;当降雨强度高于土壤入渗强度时,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,地表更容易形成物理结皮^[28],从而使水分入渗受到抑制,因此径流系数随之增大,入渗补给系数降低。另一方面入渗补给系数反映的是水分入渗的效率,是多种降雨特征综合作用结果的反应,随降雨量和降雨历时的增大,入渗效率却不一定提高。平均入渗率与 I_{30} 和平均雨强呈显著正相关,与降雨历时呈负相关,这主要是因为,平均入渗率是次降雨过程整体入渗速率的表征,雨强越大,由雨滴打击所产生的挤压力越大,从而加速了入渗水流的运动速度,使平均入渗率提高;同时,随降雨历时的延长,水分入渗时间增多,因而贯穿整个入渗过程的平均入渗速率逐渐减小。

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

Table 2 Correlation analysis between rainfall, I_{30} , mean rainfall intensity, time of rainfall duration and infiltration characteristic parameters

入渗特征参数	降雨量	I_{30}	平均雨强	降雨历时
入渗量	0.999**	0.524**	0.184	0.441**
入渗补给系数	-0.767**	-0.805**	-0.344*	-0.304
平均入渗率	0.181	0.519*	0.999**	-0.227

注: **为在0.01水平(双侧)上显著相关; *为在0.05水平(双侧)上显著相关。

2.3.3 前期含水量对土壤入渗影响

前期含水量主要通过影响土壤入渗速率进而对入渗性能产生影响。研究结果表明,入渗特征随前期含水量变化表现出明显规律性(图6)。入渗量与前期含水量呈显著负相关($R^2 = 0.13, P < 0.05$),随前期含水量增加而减小,可表示为前期含水量的线性函数。入渗补给系数与前期含水量呈显著正相关($R^2 = 0.15, P < 0.05$),随前期含水量增加而增大,可表示为前期含水量的幂函数。平均入渗率随前期含水量增加而显著递增($R^2 = 0.29, P < 0.01$),可表示为前期含水量的对数函数。入渗量和平均入渗率随前期含水量增加而减小,主要原因在于,当前期含水量越小时,土水势越低,对水分子的吸力更大,同时,土壤团聚体遇水快速收缩崩解,出现大量裂隙或裂缝,因此,雨后水分下渗更多更快^[19]。黄俊等^[1]借助野外降雨观测资料也得到类似结论。而入渗补给系数随前期含水量增加而增加,主要是因为入渗补给系数作为影响土壤入渗性能因素的综合表征,反映了水分入渗的效率,随着入渗量和平均入渗率的增减,入渗补给系数却不一定表现出相同的变化趋势。

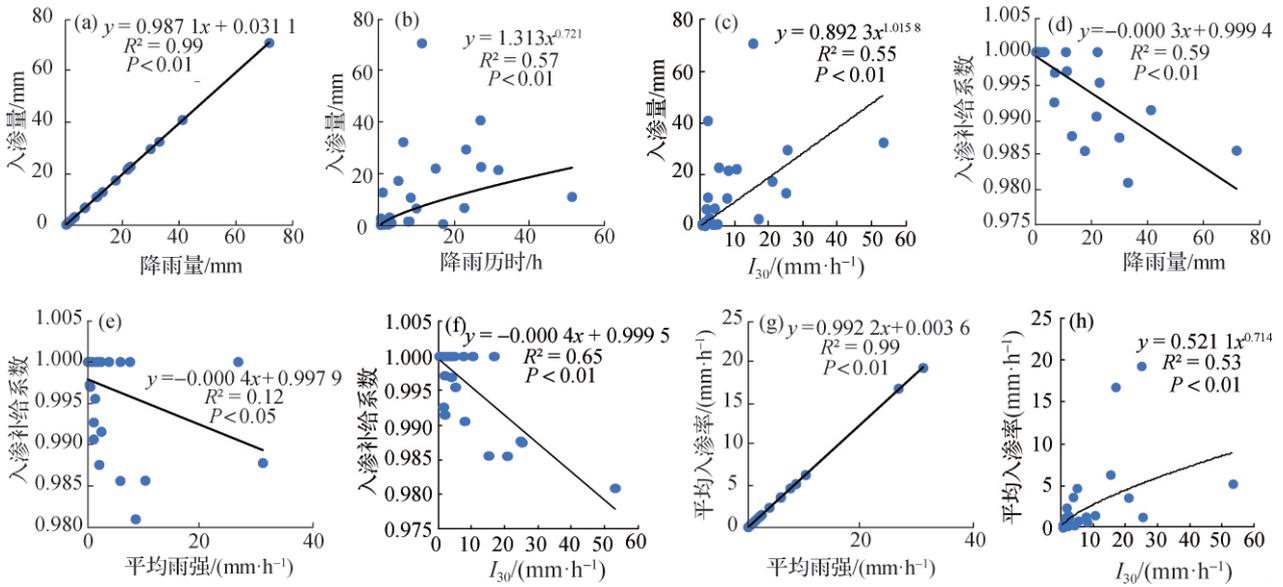


图 5 入渗特征随降雨特征的变化

Fig. 5 Variation of infiltration characteristics with rainfall characteristics

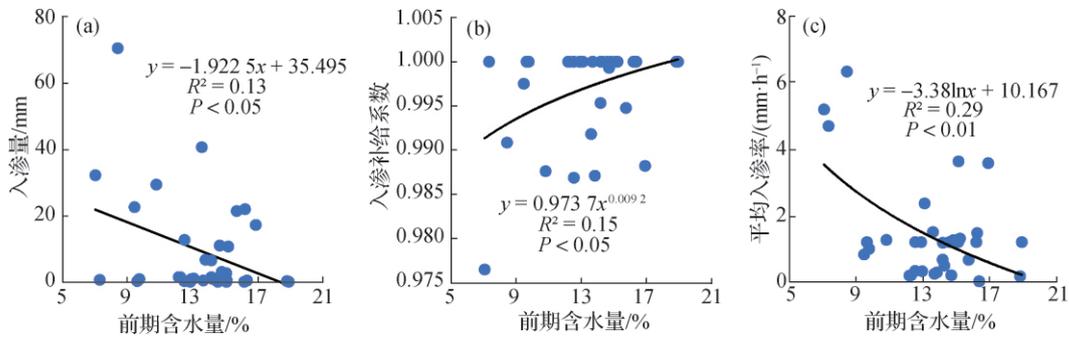


图 6 入渗特征随前期含水量的变化

Fig. 6 Variation of infiltration characteristics with antecedent water content

2.3.4 不同坡长对土壤入渗影响

坡长作为影响水分入渗的重要地形因子，主要通过改变坡面承雨量进而对土壤入渗性能产生影响。在试验条件下，当全部降雨入渗时，坡长对土壤入渗的影响无法体现，因此仅对试验期间 11 场产流降雨进行分析，取其平均值与坡长进行拟合。结果表明，入渗量、入渗补给系数和平均入渗率整体随坡长增加而增大，可表示为幂函数正相关，决定系数 R^2 均达 0.80 以上，因此，方程整体是显著的，坡长对土壤入渗量、入渗补给系数和平均入渗量的影响可用幂函数相关方程来比较准确地描述(图 7)。这与黄俊等^[1]对南方红壤的研究结果基本一致。同时也说明，当土壤类型由红壤转变为黄壤时，水分入渗随坡长变化的规律性仍然适用。但该规律性是否能推及其他土壤类型有待进一步研究。此外，本研究中，在坡长 10~50 m 范围内，入渗量、入渗补给系数和平均入渗率均随坡长增加表现出局部趋势逆转的现象，分别于 30 m 和 40 m 处出现极大值和极小值，这表明在坡长 30~40 m 之间存在一个影响入渗的临界坡长。这一结果可能受以下因素影响：首先，在相同坡度条件下，坡长越长，坡面承雨面积和汇水面积随之增大，为土壤水分入渗提供了更多物质来源；其次，随坡长增加，坡面径流也具有更长的位移，客观上延长了水分入渗时间，与此同时填洼、下渗等水量也随之增多，从而为土壤水分入渗提供更多可能^[1]。整体而言，在两方面因素共同作用下，入渗量、入渗

补给系数和平均入渗率均随坡长增加而增大, 但在 30 ~ 40 m 之间存在临界坡长。

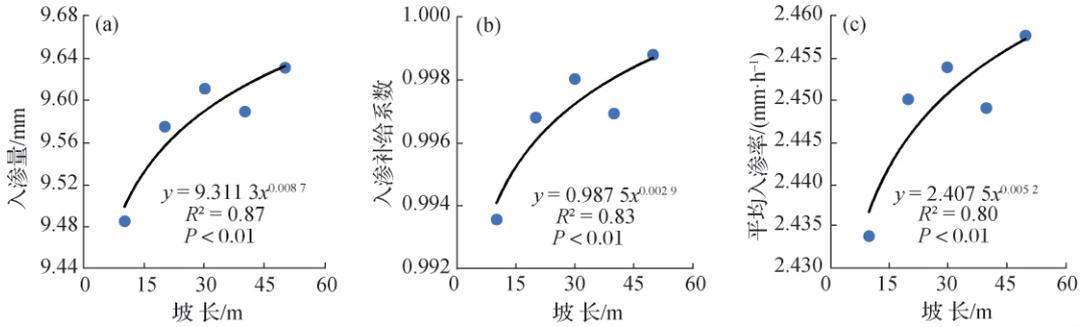


图 7 入渗特征随坡长的变化

Fig. 7 Variation of infiltration characteristics with slope length

2.3.5 植被生长对土壤入渗的影响

(1) 草地盖度对入渗影响。植被也是影响土壤入渗的重要因素之一。一般而言, 随植被盖度增加, 土壤入渗能力也会显著增强。这主要是因为植被冠层可以截留降雨, 削减雨滴动能, 保护表层土壤物理结构, 使土壤保持较好的渗透能力, 同时枯落物对水分的截持一定程度上可延长入渗时间, 植被根系对土壤的固结和缠绕作用, 也可改善土壤结构, 增加土壤孔隙, 从而增加入渗^[18-29-31]。本试验结果表明, 土壤入渗量、平均入渗率与植被盖度均呈极显著负相关 ($R^2 = 0.90, P < 0.01$; $R^2 = 0.56, P < 0.01$), 随植被盖度增加而减小, 可表示为植被盖度的对数函数。入渗补给系数与植被盖度呈极显著正相关 ($R^2 = 0.57, P < 0.01$), 随植被盖度增加而增加, 可表示为植被盖度的幂函数 (图 8)。这主要是因为, 在试验观测期内 (7—9 月), 7 月、8 月植被盖度总体偏低 (< 43%), 对于促进水分入渗作用有限, 进入 9 月后, 植被盖度不断增大并趋于稳定 (> 62%)。理论上土壤入渗性能随植被盖度增加应呈现相同的变化趋势, 即随植被盖度增加而增大。但由于试验期间的 34 场降雨中, 较大降雨量事件均集中于 7 月、8 月, 降雨量整体随时间的推移呈下降趋势, 由表 1 数据计算可知, 9 月累积降雨量相较于 7 月、8 月分别减少了 66.7% 和 36.3%。同时, 由前文分析可知, 降雨量和入渗量存在极显著正相关关系, 因此, 基于植被盖度和降雨特征在时间序列上的分布特征, 前者对土壤水分入渗的影响并未得到显著体现。这也在一定程度上说明, 同等条件下, 当植被盖度较小时, 降雨特征则成为影响入渗的主导因子。

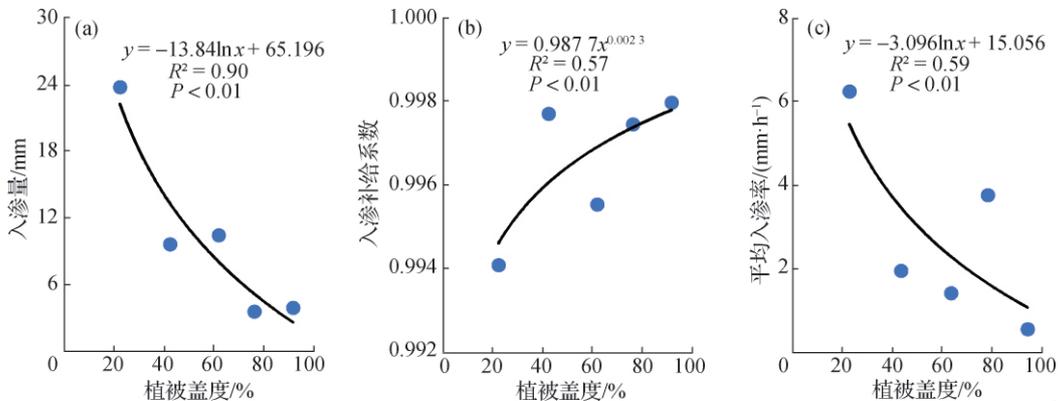


图 8 入渗特征随植被盖度的变化

Fig. 8 Variation of infiltration characteristics with vegetation coverage

(2) 植被生长与裸地对照。为进一步分析植被生长对土壤入渗的影响,将撂荒草地和裸地之间入渗特征进行了对比分析(表3)。当降雨、土壤和坡度一定时,撂荒草地的入渗性能明显高于裸地,同时两者之间的入渗差异随 I_{30} 增加而增大(表3)。由表3数据计算可知,随 I_{30} 增大,撂荒草地入渗量比裸地依次增加了0.41 mm、0.45 mm和2.4 mm,入渗补给系数依次增加了0.021、0.022和0.081,平均入渗率依次增加了0.25 mm/h、0.46 mm/h和1.16 mm/h。同时,在相同土地类型条件下,当 I_{30} 由第I梯度(<10 mm)分别增加到第II($10\sim 20$ mm)和III(>20 mm)梯度时,撂荒草地入渗量分别增加了1.85 mm和12.31 mm,相应裸地分别增加了1.85 mm和10.06 mm,而入渗补给系数分别减小了0.006、0.008、0.007和0.068,平均入渗率分别增加了3.93 mm/h、8.89 mm/h、3.72 mm/h和7.98 mm/h。整体而言,同等条件下,与裸地相比,草被生长能显著增加土壤入渗,且雨强越大,草被促进土壤入渗的作用越显著,草地和裸地之间入渗差异越明显。此外,入渗补给系数在相同土地类型条件下的变化特征也表明,草被生长可一定程度上削弱 I_{30} 对土壤入渗性能的影响,但两者之间的交互作用有待进一步研究。

表3 不同 I_{30} 条件下撂荒草地和裸地之间入渗特征差异Table 3 Difference of infiltration characteristics between grassland and bare land under different I_{30} conditions

入渗特征参数	撂荒草地			裸地		
	入渗量/ mm	入渗补给 系数	平均入渗率/ (mm·h ⁻¹)	入渗量/ mm	入渗补给 系数	平均入渗率/ (mm·h ⁻¹)
$I_{30} < 10$ mm/h	18.06	0.991	4.13	17.61	0.970	3.88
$10 \text{ mm/h} \leq I_{30} < 20 \text{ mm/h}$	19.91	0.985	8.06	19.46	0.963	7.60
$I_{30} \geq 20$ mm/h	30.37	0.983	13.02	27.67	0.902	11.86

2.4 影响坡面草地土壤入渗特征的主导因子判断

为进一步对比分析降雨特征、前期含水量、坡长和植被盖度对土壤入渗性能的影响,现将入渗量、入渗补给系数和平均入渗率分别作为母因素集,以降雨量、降雨历时、 I_{30} 、平均雨强、前期含水量、坡长和植被盖度7个因子为子因素集,以试验期间34场降雨事件土壤入渗实测数据进行灰色关联度分析(表4)。考虑到数据量纲差异,首先对所有数据进行标准差标准化处理,以便对结果进行准确比较。灰色关联度值越大,比较数列对参考数列影响越大。结果表明:对于入渗量,各影响因子对其影响权重排序为:降雨量 $>I_{30}$ $>$ 降雨历时 $>$ 平均雨强 $>$ 坡长 $>$ 前期含水量 $>$ 植被盖度;入渗补给系数为:坡长 $>I_{30}$ $>$ 降雨量 $>$ 植被盖度 $>$ 降雨历时 $>$ 前期含水量 $>$ 平均雨强;平均入渗率为:平均雨强 $>I_{30}$ $>$ 坡长 $>$ 前期含水量 $>$ 植被盖度 $>$ 降雨量 $>$ 降雨历时。以上排序结果表明,各影响因子对土壤入渗量、入渗补给系数和平均入渗率的影响程度并不一致。对入渗量影响最大的是降雨量,对入渗补给系数影响最大的是坡长、 I_{30} 和降雨量,对平均入渗率影响最大的则是平均雨强。这主要是因为,降雨量增加客观上使水分入渗的绝对量增大,对入渗量的影响最大;而入渗补给系数作为各影响因素综合作用的结果,同时受到坡长、 I_{30} 和降雨量几个因素的显著影响;平均入渗率和平均雨强均为降雨历时的函数,随降雨历时延长而减小,两者表现出较高的关联性。此外,降雨历时决定着水分入渗时间,而前期含水率和植被生长可通过改变土壤性质进而对水分入渗产生重要的间接影响,它们对土壤入渗的影响不可忽视,这与许多研究结论一致^[32-35]。因此,在进行土壤水分入渗建模时,前期含水量

表4 影响坡面草地入渗的各因子灰色关联度值

Table 4 Grey correlation value of factors affecting infiltration of sloping grassland

入渗特征参数	降雨量	降雨历时	I_{30}	平均雨强	前期含水量	植被盖度	坡长
入渗量	0.998	0.862	0.863	0.804	0.780	0.772	0.781
入渗补给系数	0.921	0.807	0.932	0.798	0.799	0.813	0.964
平均入渗率	0.815	0.777	0.865	0.998	0.820	0.817	0.824

和植被状况也应纳入考虑范畴。同时,主成分分析结果也表明,土壤入渗主要受坡长和降雨影响,与灰色关联度分析结果一致。

3 结 论

(1) 不同入渗特征参数对降雨特征的响应存在差异。入渗量随降雨量增加呈线性递增,随降雨历时和最大30 min雨强增大均呈幂函数递增;入渗补给系数随降雨量、平均雨强和最大30 min雨强增加分别呈线性、对数和线性减小;平均入渗率随平均雨强和最大30 min雨强增大分别呈线性和幂函数增加。

(2) 入渗量和平均入渗率随前期含水率增加分别呈线性和对数减小,但入渗补给系数随前期含水量增加呈幂函数递增,即当入渗量和平均入渗速率减小时,入渗效率不一定降低。

(3) 土壤入渗量、入渗补给系数和平均入渗率均随整体坡长增加而呈幂函数增大。同时,3个入渗特征参数分别在坡长30 m和40 m处出现极大值和极小值。

(4) 灰色关联度分析结果表明,在入渗效率较高的情况下,植被对坡面入渗的促进作用不显著,坡面入渗主要受降雨特征和坡长影响。

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子与估算模型研究[J].农业机械学报,2016,47(8):171-178.(HUANG J, JIN P W, LI M, et al. Influencing factors of soil infiltration rate and its estimation model at runoff-plot scale [J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(8): 171-178. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] LI C J, PAN C Z. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall [J]. Journal of hydrology, 2018, 558: 90-103.
- [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]. The 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] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 任长江,赵勇,王建华,等.斥水性土壤水分入渗试验和模型[J].水科学进展,2018,29(6):839-847.(REN C J, ZHAO Y, WANG J H, et al. An experimental and modeling study of water infiltration on water-repellent soil [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(6): 839-847. (in Chinese))
- [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 & Development, 2019, 30(5): 494-503.
- [13] 钟韵,费良军,刘乐,等.膜孔灌溉下土壤入渗特征的多因素分析[J].水科学进展,2018,29(4):505-513.(ZHONG Y, FEI L J, LIU L, et al. Analysis on soil infiltration characteristics of film hole irrigation as affected by multi-factors [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 505-513. (in Chinese))

- [14] 张西平,程伍群,绳莉丽,等.耕作及种植方式对土壤入渗参数和畦灌水流运动的影响[J].农业工程学报,2019,35(12):89-97.(ZHANG X P, CHENG W Q, SHENG L L, et al. Effects of tillage and planting patterns on soil infiltration parameters and water flow of border irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(12): 89-97. (in Chinese))
- [15] DENG L Z, ZHANG L P, FAN X J, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield from hillslopes with weathered granite[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(31): 32559-32573.
- [16] 王振龙,杜明成,姜翠玲,等.基于人工降雨试验的淮北地区产流产沙差异性研究[J].水科学进展,2019,30(4):507-514.(WANG Z L, DU M C, JIANG C L, et al. Difference of runoff and sediment yield under various experimental conditions for the Huaibei area based on artificial rainfall simulations[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(4): 507-514. (in Chinese))
- [17] CUI Z, WU G L, HUANG Z, et al. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils[J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124023.
- [18] HAO H, WEI Y, CAO D, et al. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 198: 104542.
- [19] LIU Y, CUI Z, HUANG Z, et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China[J]. Catena, 2019, 182: 104147.
- [20] van de GIESEN N, STOMPH T J, AJAYI A E, et al. Scale effects in Hortonian surface runoff on agricultural slopes in West Africa: field data and models[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(1/2): 95-101.
- [21] LAL R. Effects of slope length on runoff from alfisols in Western Nigeria[J]. Geoderma, 1983, 31(3): 185-193.
- [22] LAL R. Soil degradative effects of slope length and tillage methods on alfisols in western Nigeria: I: runoff, erosion and crop response[J]. Land Degradation & Development, 1997, 8(3): 201-219.
- [23] ZHANG G H, XIE Z F. Soil surface roughness decay under different topographic conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187: 92-101.
- [24] 熊沛枫.黄土丘陵区草地群落冠层降雨截留特征及优势种对降雨的响应[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.(XIONG P F. Canopy rainfall interception characteristics of grassland community in loess hilly-gully region and its dominant species in response to simulated rainfall[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese))
- [25] ZHENG J, FAN J L, ZHANG F C, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by maize canopy on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 195: 25-36.
- [26] CHEN X G, LI Y, CHAU H W, et al. The spatiotemporal variations of soil water content and soil temperature and the influences of precipitation and air temperature at the daily, monthly, and annual timescales in China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 140: 429-451.
- [27] 廖义善,孔朝晖,卓慕宁,等.华南红壤区坡面产流产沙对植被的响应[J].水利学报,2017,48(5):613-622.(LIAO Y S, KONG C H, ZHUO M N, et al. Response of runoff and sediment reductions to plants in red soil region of Southern China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(5): 613-622. (in Chinese))
- [28] 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.(DENG L Z, ZHANG L P, FAN X J, et al. Characteristics of runoff and sediment yield under different rainfall intensities and slope gradients in erosive weathered granite area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 143-150. (in Chinese))
- [29] LIN Q T, XU Q, WU F Q, et al. Effects of wheat in regulating runoff and sediment on different slope gradients and under different rainfall intensities[J]. Catena, 2019, 183: 104196.
- [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] GUO K, LIU X J. Effect of initial soil water content and bulk density on the infiltration and desalination of melting saline ice water in coastal saline soil[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(6): 1249-1266.
- [33] SCHOENER G, STONE M C. Impact of antecedent soil moisture on runoff from a semiarid catchment[J]. Journal of Hydrology,

2019, 569: 627-636.

- [34] WU G L, HUANG Z, LIU Y F, et al. Soil water response of plant functional groups along an artificial legume grassland succession under semi-arid conditions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107670.
- [35] LIU Y, CUI Z, HUANG Z, et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China [J]. *Catena*, 2019, 182: 104147.

Experimental study on the influencing factors of infiltration characteristics of abandoned grassland on slope scale in the loess hilly and gully region*

XIAO Jing^{1 2}, WANG Bing^{1 3}

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

Abstract: To explore the influence of various factors on the infiltration characteristics of abandoned grassland in the loess hilly and gully region of the Loess Plateau, a natural rainfall field observation method was used to study the influence of rainfall characteristics (rainfall, average rainfall intensity, rainfall duration and the maximum 30 min rainfall intensity (I_{30})), antecedent soil water content, slope length (10 m, 20 m, 30 m, 40 m and 50 m), and vegetation coverage on soil infiltration characteristics. The grey correlation method was used to determine the dominant factors affecting the infiltration characteristics of the abandoned grassland. It was found that the infiltration amount increased significantly with increasing rainfall, rainfall duration and I_{30} ($R^2 > 0.55$, $P < 0.01$). The infiltration supplement coefficient decreased with increasing rainfall, I_{30} and average rainfall intensity ($R^2 > 0.12$, $P < 0.05$). The average infiltration rate increased with increasing rainfall intensity and I_{30} ($R^2 > 0.53$, $P < 0.01$). The infiltration amount and average infiltration rate decreased with the increase of antecedent soil water content, whereas the infiltration supplement coefficient increased with the increase of antecedent soil water content ($R^2 > 0.13$, $P < 0.05$). The infiltration amount, infiltration supplement coefficient and average infiltration rate increased as the slope length increased ($R^2 > 0.56$, $P < 0.01$). However, there was a critical slope length between 30 m and 40 m. Rainfall characteristics and slope length were the main factors affecting soil infiltration, and the effect of vegetation coverage on soil infiltration was not significant as the infiltration efficiency was high.

Key words: rainfall characteristics; grassland coverage; slope length; antecedent soil water content; soil infiltration; the loess hilly and gully region

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41771555; No.41530858).