

不同坡度和不同生育期的谷子坡耕地入渗特征

付世琳^{1,2}, 姚冲^{1,2}, 余倩^{1,2}, 吴发启^{1,3}

(1.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;

2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:坡度和作物生育期是影响坡耕地土壤入渗性能的关键因素,作物生长导致土壤特性及根系变化进而影响坡面入渗过程。通过人工模拟降雨试验,设计 4 个坡耕地坡度(3° , 5° , 10° , 15°)及 2 个降雨强度(40, 80 mm/h),在谷子 4 个生育期(拔节初期、拔节中期、抽穗初期、灌浆初期)开展试验,探究坡度和生育期对谷子坡耕地土壤入渗特征的影响机制,并结合入渗模型(Horton、Kostiakov、Philip 模型)对谷子坡耕地土壤水分入渗过程进行拟合并评价其适用性。结果表明:(1)随坡度增加土壤入渗能力下降,与 3° 相比, 15° 坡耕地土壤稳定入渗速率、平均入渗速率及累积入渗量分别减小 30.76%~52.38%, 21.28%~37.50% 和 22.51%~43.55%。(2)随着谷子生育期的延长,土壤入渗能力显著增加,与拔节初期相比,灌浆初期时土壤稳定入渗速率、平均入渗速率及累积入渗量分别增加 23.81%~80.00%, 20.83%~40.00%, 17.84%~54.10%,表现为拔节初期<拔节中期<抽穗初期<灌浆初期。(3)通过对入渗速率实测值进行拟合,Horton 模型对坡耕地土壤入渗过程拟合最好,且模型拟合参数具有物理意义。研究结果可为增加坡耕地降雨入渗、提高水分利用效率、减少坡耕地水土流失提供理论依据。

关键词:土壤侵蚀;坡耕地;入渗速率;坡度;生育期

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)04-0023-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.004

Infiltration Characteristics of Millet Slope Farmland with Different Slope Gradient and Different Growth Period

FU Shilin^{1,2}, YAO Chong^{1,2}, YU Qian^{1,2}, WU Faqi^{1,3}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling,

Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Slope and crop growth period are the key factors affecting the soil infiltration performance of sloping farmland, and crop growth can result in soil characteristics and root changes, which further affect the slope infiltration process. Through artificial simulated rainfall experiments, the slopes (3° , 5° , 10° and 15°) and 2 rainfall intensities (40 and 80 mm/h) of four slope cultivated land were designed, and the experiments were carried out in four growth stages of millet (early jointing period, middle jointing period, early heading period, early pustulation period) to explore the influence mechanism of slope and growth period on soil infiltration characteristics of millet slope farmland, and combined with the infiltration model (Horton, Kostiakov and Philip models) to evaluate the applicability of soil moisture infiltration process in cultivated land of millet slope. The results showed that: (1) The soil infiltration capacity decreased with the increase of slope, and compared with the slope of 3° , the stable infiltration rate, average infiltration rate and cumulative infiltration rate of the soil in farmland of 15° slope decreased by 30.76%~52.38%, 21.28%~37.50% and 22.51%~43.55%, respectively. (2) With the extension of millet growth period, soil infiltration capacity increased significantly, and compared with the early jointing stage, the stable infiltration rate, average infiltration rate and cumulative infiltration amount of soil in the early filling stage increased by 23.81%~80.00%,

收稿日期:2022-12-05

资助项目:国家自然科学基金项目(41977065);国家重点实验室开放基金项目(k3050219171)

第一作者:付世琳(2000—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:750403695@qq.com

通信作者:吴发启(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持研究。E-mail:wufaqi@263.net

20.83%~40.00% and 17.84%~54.10%, respectively, showing that the early jointing period < the middle jointing period < the early heading period < the early pustulation period. (3) By fitting the measured values of infiltration rate, the Horton model could best fit the soil infiltration process of slope farmland, and the fitting parameters of the model had physical significance. The research results can provide a theoretical basis for increasing rainfall infiltration, improving water use efficiency and reducing water and soil loss in sloping farmland.

Keywords: soil erosion; slope farmland; infiltration rate; slope; growth period

黄土高原地区,严重的水土流失问题制约着当地经济发展和生态环境建设^[1]。坡耕地是黄土高原水土流失的主要策源地,其土壤侵蚀量占流域总侵蚀量的 50%~60%^[2]。土壤入渗性能是土壤重要的物理性质之一^[3],决定坡面径流的产生和发展^[4],同时受控于坡度、降雨强度、植被、土壤性质及坡面粗糙度等因素^[5-10]。坡耕地作物生长导致的地表糙度、植被覆盖度、土壤特性、根系特征等变化显著地影响降雨再分配及入渗过程,进而影响坡面土壤侵蚀。因此选取黄土高原典型作物(谷子),研究其不同生育期在不同坡度、降雨条件下的入渗过程,对防治坡耕地土壤侵蚀和提高雨水资源化利用具有重要意义。

坡度和降雨强度是影响坡耕地土壤入渗过程的重要因素。降雨强度主要通过增加降雨量进而影响土壤入渗过程。坡度通过增加其沿坡面方向的分力进而加快坡面径流的形成,从而影响其入渗过程。随着坡耕地坡度增加,产流历时将会提前,稳定入渗速率降低^[11]。傅斌等^[12]通过人工模拟降雨试验发现,随坡度增加,坡面稳定入渗速率表现为增—减—增的变化趋势;吴发启等^[13]、李明森^[14]通过人工模拟降雨试验研究发现,坡面初始产流时间与坡度、雨强呈负相关关系。研究坡耕地不同坡度和降雨条件下的入渗特征有利于揭示坡耕地对降雨径流的调控机制。

坡耕地作物生长可以通过影响地上植被和地下根系特征、土壤特性,进而对土壤入渗性能产生显著影响^[15-19]。随作物生长,其抵抗土壤侵蚀能力不断增强,但作物生长发育到一定时期时其拦沙蓄水能力会逐渐达到稳定状态^[20]。作物的生长发育过程也可改善土壤结构和属性,作物根系生长可显著增大土壤孔隙度,且耕地土壤的质地、容重、含水量及土壤孔隙度等理化性质受到作物生育期、作物类型等因素的影响^[21],进而对水分入渗过程产生不同程度的影响^[22]。作物覆盖对降雨具有截留和分流作用^[16],抑制坡面土壤物理结皮发育,从而改善坡面土壤的入渗性能。但坡耕地作物生长导致的土壤入渗速率的变化规律目前尚不清楚^[23-24],因此研究不同生育期谷子坡耕地入渗性能是非常必要的。

黄土高原地区水土流失问题严重,坡耕地是当地主要的土地利用类型,谷子是防治坡耕地水土流失的

典型农作物之一,关中地区主要种植夏谷,同时夏季是关中地区降雨集中分布的季节。谷子在坡耕地防蚀方面发挥着重要作用,但不同降雨、坡度条件下谷子坡耕地在不同生育期的入渗特征尚未明确。谷子的蓄水保土效用对于关中地区的水土流失防治具有重要影响,但是在关中地区,试验主要侧重于林地和草地的防蚀机制,对农田防蚀机制的研究较少。因此以谷子坡耕地为研究对象,采用人工模拟降雨,研究谷子坡耕地土壤入渗特征及变化规律,并采用入渗模型对谷子坡耕地入渗过程进行拟合,为提高谷子坡耕地水分利用效率、减少坡面水土流失提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于 2021 年 7—9 月在陕西省杨凌高新技术示范区(34°14′—34°20′N,107°59′—108°08′E)西北农林科技大学水土保持工程实验室内进行。研究区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均降水量为 635.1~663.9 mm,全年约 70%的降水集中在 5—9 月,且多大暴雨,年平均气温为 12.9℃。土地利用类型多为农用地,现有耕地面积约 5 724.03 hm²,主要种植小麦、玉米、谷子等。该试验研究土壤选用**塋土**,**塋土**为关中地区重要的农业土壤,土壤肥沃适宜耕作,是当地森林褐土经长期耕作和施用土肥形成的一种特殊土壤。**塋土**黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 26.5%,43.2%,30.3%。

1.2 试验设计

试验径流小区的规格为长 4 m,宽 1 m。试验用土为当地农田 0—20 cm 的表层耕作土壤,分层填装入径流小区内,并控制前期土壤含水量。种植的谷子品种为“晋谷 29”。以 10 cm×20 cm 的株行距种植。播种前进行人工翻耕整地,施用适量的有机肥和磷酸二铵。为消除杂草对坡面入渗性能的影响,在径流小区上全面喷洒除草剂,并设置裸坡作为对照。参考当地降雨强度特点和地形特点,试验小区共设置 4 个坡度(3°,5°,10°,15°)、2 个降雨强度(40,80 mm/h)进行人工模拟降雨试验,在 4 个生育期(拔节初期、拔节中期、抽穗初期、灌浆初期)的谷子种植坡面开展入渗试验,模拟降雨历时为 60 min,记录并观测不同坡度谷子坡耕地坡面的入渗特征。

人工模拟降雨试验采用的降雨设备为中国科学

院水利部水土保持研究所研制的测喷式降雨机,该降雨机降雨高度为 7.5 m,有效降雨面积为 5 m×7 m,降雨均匀度>80%,降雨强度的调控范围为 30~140 mm/h,采用调节水压力控制阀和更换喷头垫片的方式调节雨强。降雨前需要先率定雨强,满足试验要求后进行降雨试验。

1.3 指标测定与计算

降雨试验开始计时后,观察并记录各小区的产流时间,产流开始时用塑料小桶收集径流和泥沙样品,时间间隔为 2 min,直至试验结束。降雨试验结束后,称取每份样品重,待样品静置 24 h 后倒掉上清液,将沉淀的泥沙样品冲入铝盒,放入 105 ℃ 的烘箱中烘干至恒重,称重,记录时段径流量与产沙量,然后通过计算得出土壤入渗速率和累积入渗量等指标。坡耕地坡度的不同可影响径流小区有效降雨面积,在计算降水量时需校正。

土壤入渗速率采用降雨—入渗法计算(水量的闭合计算不包括壤中流),计算方法为:

$$h = 6000W/A \quad (1)$$

$$V = P - h \quad (2)$$

式中: h 为径流深(mm/min); W 为径流量(m^3/s); A 为径流小区面积(m^2); V 为土壤入渗速率(mm/min); P 为降雨强度(mm/min)。

1.4 入渗模型

为更加深入分析不同坡度谷子坡耕地土壤入渗特征及变化规律,分别选取 Philip、Kostiakov 和 Horton 模型对坡面入渗过程进行拟合,各入渗模型为:

(1) Philip 模型

$$i(t) = i_c + 0.5St^{-0.5} \quad (3)$$

式中: $i(t)$ 为入渗速率(mm/min); i_c 为稳定入渗速率(mm/min); S 为吸湿率($mm/min^{0.5}$); t 为入渗时间(min)。

(2) Kostiakov 模型

$$i(t) = at^{-b} \quad (4)$$

式中: a 、 b 为入渗参数。

(3) Horton 模型

$$i(t) = i_c + (i_1 - i_c)e^{-kt} \quad (5)$$

式中: i_1 为初始入渗速率(mm/min); k 为入渗模型参数。

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2021 软件对试验数据进行处理分析,并且使用 Origin 2017 软件制作图表,用 SPSS 22.0 软件进行模型拟合。

2 结果与分析

2.1 不同坡度坡面的土壤入渗过程

图 1 和图 2 为谷子坡耕地 40, 80 mm/h 降雨条

件下不同坡度坡面入渗速率的动态变化过程。不同坡度谷子坡耕地的入渗速率随时间的变化规律具有较强的一致性,均表现为先下降后稳定波动,入渗速率与时间呈负相关关系。入渗初期,坡耕地土壤具有较高的初始入渗性能,此时土壤入渗速率最大,随时间推移土壤入渗速率急剧减小并逐渐趋于稳定。根据入渗时间大致可将土壤入渗过程分为入渗速率瞬变阶段、渐变阶段、稳定波动阶段 3 个阶段。(1)入渗速率瞬变阶段(0~25 min):土壤入渗速率变化极大,主要是因为入渗初始是土壤浸润阶段,由于分子力作用,土壤与水分作用形成薄膜水,水分在重力因素影响下形成水压,使下渗锋面快速延伸,此阶段入渗速率较大且变化较快。(2)渐变阶段(25~50 min):渐变阶段下渗的水分由于受土壤毛管孔隙的引力及其自身重力的作用,土壤间的孔隙被逐步填满,入渗速率持续降低,入渗速率逐渐放缓。(3)稳定波动阶段(50~60 min):稳定波动阶段时,土壤孔隙中水分已经达到饱和状态,水分在重力作用下运动,土壤入渗速率在此阶段逐渐趋于稳定,达到稳定入渗状态。

2.2 坡度对坡耕地土壤入渗特征的影响

2.2.1 坡度对坡面稳定入渗速率的影响 由图 3 可知,在 40, 80 mm/h 2 种雨强条件下,随坡度变化土壤稳定入渗速率发生明显变化,同一谷子生育期土壤稳定入渗速率随坡度增大而降低。40 mm/h 降雨条件下,谷子拔节初期 4 个坡度(由小到大)稳定入渗速率分别为 0.42, 0.32, 0.29, 0.20 mm/min,随坡度增加稳定入渗速率分别降低 23.81%, 30.95%, 52.38%;谷子灌浆初期稳定入渗速率分别为 0.52, 0.48, 0.43, 0.36 mm/min,随坡耕地坡度增加稳定入渗速率分别降低 7.60%, 17.31%, 30.77%。80 mm/h 降雨条件下,谷子拔节初期时稳定入渗速率分别为 0.61, 0.52, 0.27, 0.34 mm/min,随坡度增加稳定入渗速率分别降低 14.75%, 55.73%, 44.26%;谷子灌浆初期时坡面稳定入渗速率分别为 0.87, 0.84, 0.65, 0.63 mm/min,随坡度增加稳定入渗速率分别降低 3.45%, 25.28%, 27.59%。结果表明,在生育期和雨强相同时,坡度增大使谷子坡耕地稳定入渗速率减小,整体表现为 $3^\circ > 5^\circ > 10^\circ > 15^\circ$ 。这主要是因为,在稳定入渗阶段土壤孔隙中水分已经达到饱和,各径流小区土壤入渗速率也基本趋于稳定,土壤水分入渗主要受水压力的影响,随坡度增加径流沿坡面方向的分力增大,垂直坡面的压力减小,使得坡面稳定入渗速率减小。

由图 3 可知,坡度相同时,谷子不同生育期坡面稳定入渗速率具有明显差异,随谷子生长坡面稳定入渗速率逐渐增大。在 40 mm/h 雨强时,随谷子生长 3° 坡耕地的稳定入渗速率分别为 0.42, 0.44, 0.49, 0.52 mm/min,与拔节初期相比,其他生育期坡面稳

定入渗速率分别增加 0.02, 0.07, 0.10 mm/min; 随谷子生长 15° 坡耕地稳定入渗速率依次为 0.20, 0.29, 0.31, 0.36 mm/min, 与拔节初期相比, 其他生育期坡面稳定入渗分别增加 0.09, 0.11, 0.16 mm/min。结果表明, 谷子生长可明显影响坡面稳定入渗速率, 当降雨强度和坡耕地坡度相同时, 谷子各生育期坡面稳

定入渗速率表现为拔节初期 < 拔节中期 < 抽穗初期 < 灌浆初期。这一现象主要是由于在拔节初期时谷子冠层较稀疏, 谷子的截留降雨和拦蓄径流作用较弱; 随谷子生长, 谷子冠层覆盖度增加, 对降雨的截留和分流作用增强, 且谷子根系生长改善土壤结构, 增加土壤孔隙度, 从而增大坡面稳定入渗速率。

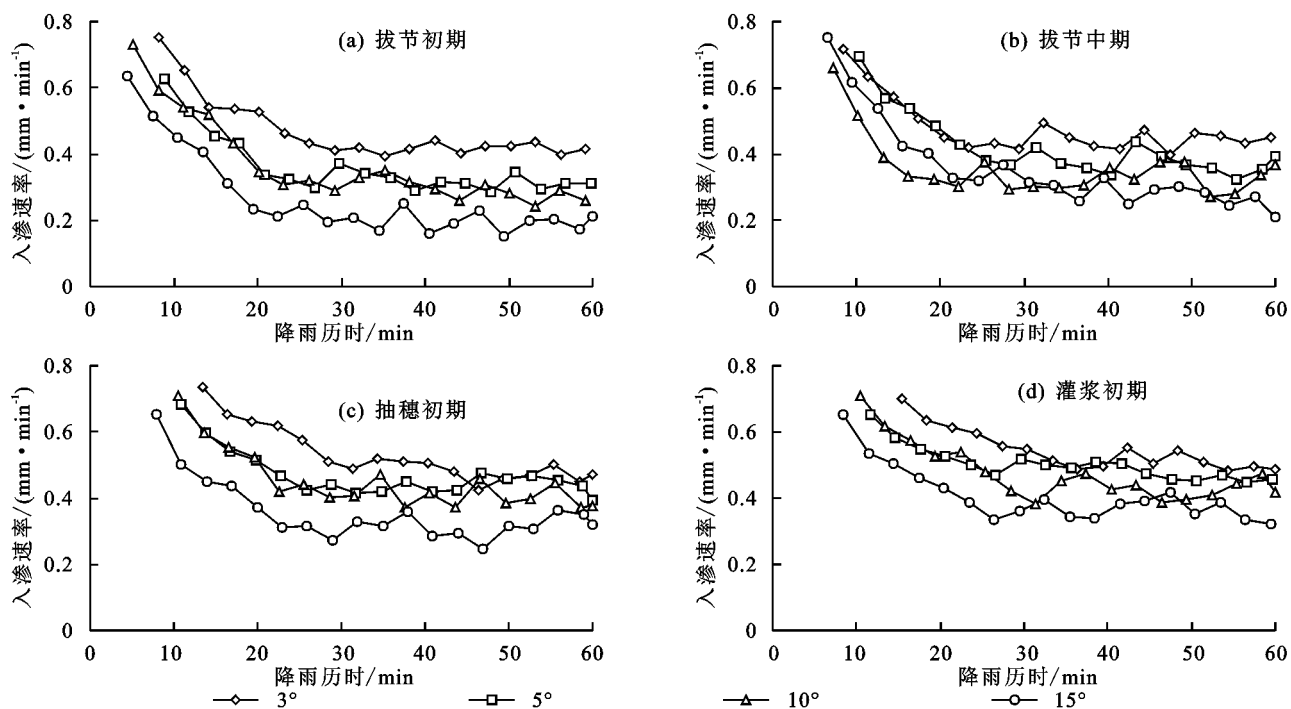


图 1 40 mm/h 雨强条件下不同生育期不同坡度坡面的土壤入渗过程

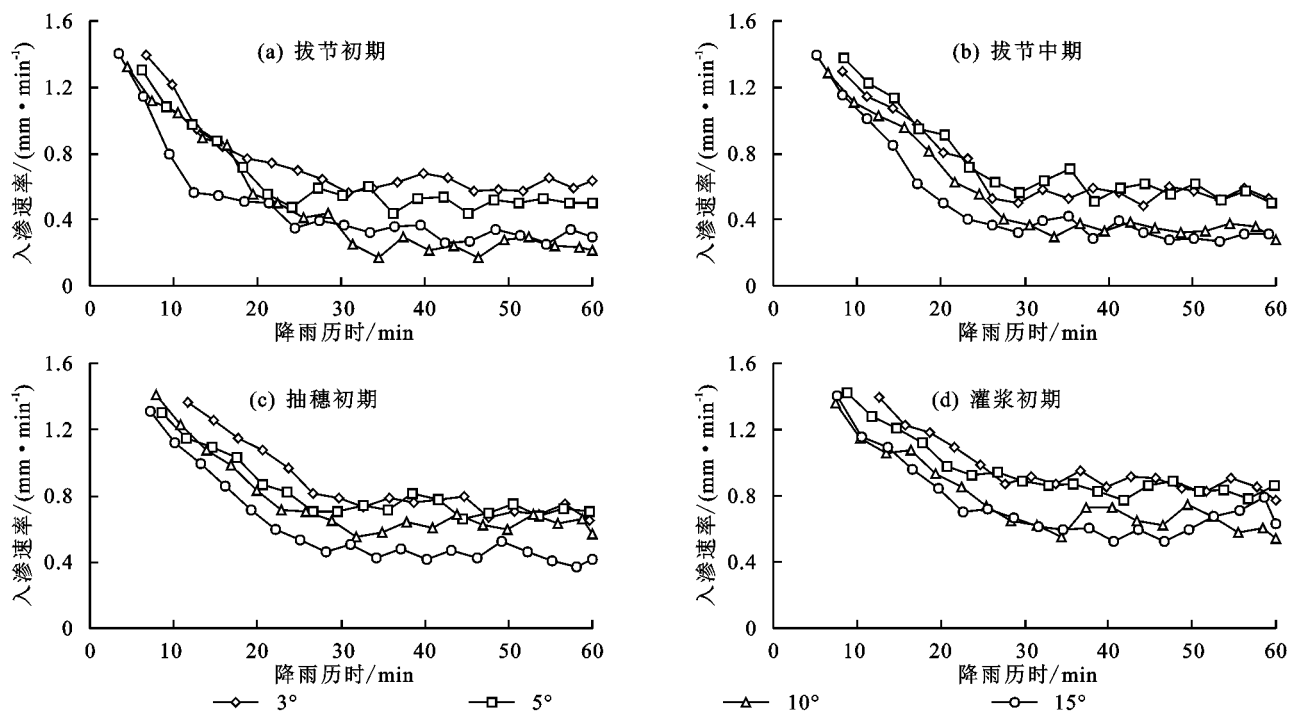


图 2 80 mm/h 雨强条件下不同生育期不同坡度坡面的土壤入渗过程

2.2.2 坡度对坡面平均入渗速率的影响 由表 1 可知, 在 40, 80 mm/h 2 种降雨条件下坡耕地坡度和谷子生育期对坡面平均入渗速率具有明显影响, 随坡度增加坡面平均入渗速率降低。在 40 mm/h 雨强条件下谷

子拔节初期时, 与 3° 坡耕地相比, 5°, 10°, 15° 坡面平均入渗速率分别降低 18.75%, 22.92%, 37.50%; 灌浆初期, 5°, 10°, 15° 坡面平均入渗速率较 3° 坡耕地分别降低 6.90%, 15.52%, 27.58%。80 mm/h 雨强条件下, 谷子拔节初期

时随坡度增加坡面平均入渗速率分别降低 6.80%, 26.03%, 39.72%; 抽穗初期, 与 3°坡耕地相比, 5°, 10°, 15°坡面平均入渗速率分别降低 11.46%, 17.70%, 31.25%。结果表明, 坡面平均入渗速率随坡度增加逐渐减小, 表现为 3°>5°>10°>15°。这主要与谷子坡耕地表面水层的受压情况有关, 径流水分入渗受大气压力和水层压力的综合作用。随坡耕地坡度增加, 径流沿坡面方向的分力增大, 垂直坡面的压力减小, 从而使得坡面平均入

渗速率减小。此外, 随谷子生长坡面平均入渗速率呈逐渐上升的变化趋势, 谷子灌浆初期的坡面平均入渗速率明显大于其他生育期。雨强增大可明显增加坡面平均入渗速率, 80 mm/h 雨强条件下坡耕地平均入渗速率为 40 mm/h 雨强时的 1.32~1.86 倍, 这与水体自重力的增加和雨滴打击对水体产生的冲力有关, 其不仅可以加速入渗水流的速率, 也可使部分静止的毛管水加入入渗水流中, 从而使坡面平均入渗速率增加。

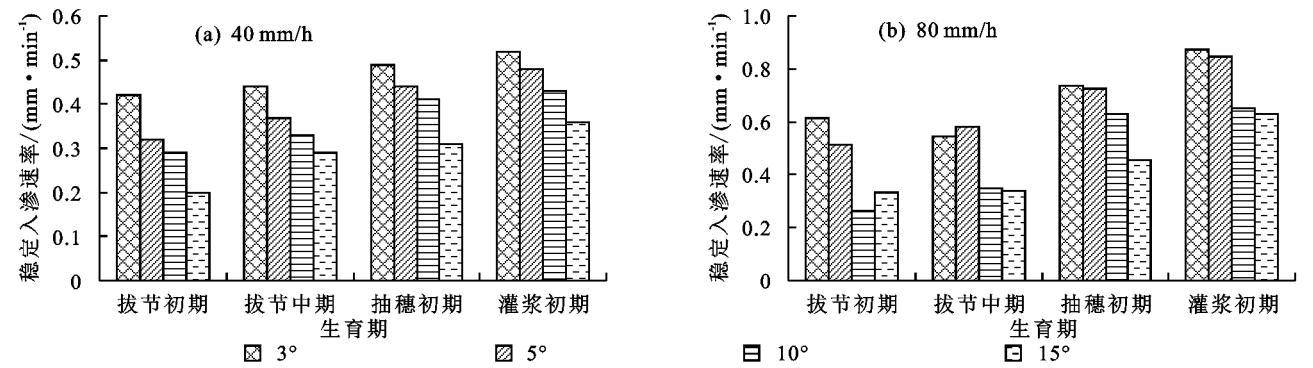


图 3 2 种雨强条件下坡度及生育期对坡耕地稳定入渗速率的影响

表 1 2 种雨强条件下不同坡度及生育期的坡耕地平均入渗速率 单位: mm/min

坡度/(°)	拔节初期		拔节中期		抽穗初期		灌浆初期	
	40 mm/h	80 mm/h	40 mm/h	80 mm/h	40 mm/h	80 mm/h	40 mm/h	80 mm/h
3	0.48	0.73	0.47	0.78	0.54	0.96	0.58	0.99
5	0.39	0.68	0.48	0.79	0.49	0.85	0.54	0.99
10	0.37	0.54	0.38	0.59	0.49	0.79	0.49	0.81
15	0.30	0.44	0.37	0.49	0.38	0.66	0.42	0.78

2.2.3 坡度对坡面土壤累积入渗量的影响 由图 4 可知, 在 40, 80 mm/h 2 种降雨条件下, 同一谷子生育期坡面累积入渗量随坡度增大而降低。40 mm/h 雨强谷子处于拔节初期时, 随坡度增加单位时间各坡面累积入渗量分别为 29.37, 23.16, 22.60, 16.58 mm, 与 3°相比, 5°, 10°, 15°坡面累积入渗量分别减少 21.14%, 23.05%, 43.55%; 谷子抽穗初期时随坡度增加单位时间各坡面累积入渗量分别为 33.96, 30.02, 29.15, 22.99 mm, 与 3°相比, 5°, 10°, 15°坡面累积入渗量分别减少 11.60%, 14.16%, 32.30%。可知不同生育期坡面累积

入渗量随坡度变化规律基本一致, 随坡度增加坡耕地土壤累积入渗量减小, 不同生育期坡面累积入渗量随坡度变化的降幅不同。同一坡度, 随谷子生长坡耕地土壤累积入渗量增大, 表现为拔节初期<拔节中期<抽穗初期<灌浆初期。谷子的防蚀作用是地上部分截留拦蓄和地下根系固结土壤共同作用的结果, 谷子生长可明显增大坡面土壤累积入渗量。随谷子生长其冠层对降雨的拦挡减速作用增强, 且作物根系穿透土壤产生的孔隙可以扩大水分渗透通道, 从而增大坡面累积入渗量。

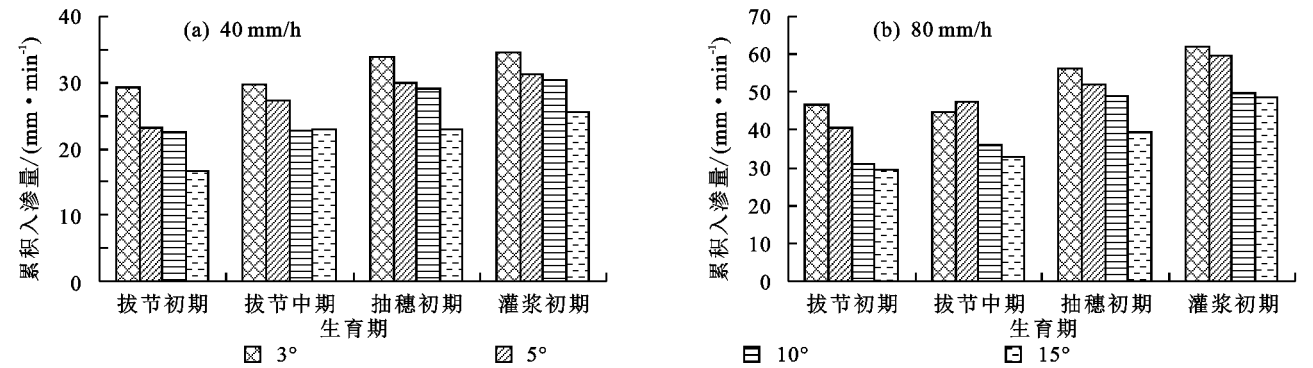


图 4 2 种雨强条件下坡度及生育期对坡耕地累积入渗量的影响

2.3 土壤水分入渗过程模型拟合

为进一步分析坡度和作物生育期对坡耕地土壤

水分入渗过程的影响, 本研究选用 Philip、Kostiakov 和 Horton 模型对实测入渗速率数据进行拟合和分

析。不同模型对入渗过程的拟合效果可以用回归方程的决定系数(R^2)表示, R^2 值越大,拟合效果越好。由表 2 可知,3 种模型对谷子坡耕地土壤入渗过程的拟合效果存在一定差异, R^2 值从大到小依次为 Horton 模型、Kostiakov 模型、Philip 模型,Horton 模型的拟合优度优于其他 2 种模型。与 40 mm/h 雨强相比,80 mm/h 雨强时 3 种入渗模型的拟合效果更好。由表 3 和表 4 可知,Horton 模型拟合参数具有物理意义,可以非常直观地拟合坡面初始入渗速率(i_1)和稳定入渗速率(i_c)。在一定雨强和生育期条件下,随坡度增大拟合得出的土壤初始入渗速率和稳定入渗速率减小,与实测结果一致。40,80 mm/h 降雨强度下, R^2 的取值范围分别为 0.853~0.960,0.910~0.977,初始入渗速率(i_1)的范围分别为 0.937~2.510,1.815~2.978,稳定入渗速率(i_c)的范围分别为 0.185~0.497,0.162~0.844,雨强增大可显著增加土壤初始入渗速率和稳定入渗速

率,与实测结果一致。随着谷子的生长,拟合得出的稳定入渗速率表现为拔节初期<拔节中期<抽穗初期<灌浆初期,与实际入渗过程中的变化规律一致。

由表 5 可知,Kostiakov 模型中获取的拟合参数 a 可表示土壤初始入渗速率, b 表示入渗速率衰退程度。40,80 mm/h 雨强条件下 R^2 分别为 0.536~0.941,0.823~0.963,坡耕地入渗模型参数(a)分别为 0.967~1.954,2.683~5.382,即随降雨强度增大土壤初始入渗速率显著增加。在同一雨强和生育期条件下,坡度对模型中的 b 具有明显影响, b 随坡度增加逐渐增加,即坡度增大可使坡面入渗速率衰退程度加快, b 的变化与实际情况相符,但参数 a 对实际入渗过程的描述作用不明显。

通过对实际入渗过程进行模型拟合,Horton 模型对坡耕地入渗过程拟合最好,且模型拟合参数具有物理意义,对谷子坡耕地土壤实际入渗过程的适用性更好。

表 2 土壤入渗模型拟合决定系数(R^2)

生育期	坡度/(°)	Philip 模型		Kostiakov 模型		Horton 模型	
		40 mm/h	80 mm/h	40 mm/h	80 mm/h	40 mm/h	80 mm/h
拔节初期	3	0.725	0.902	0.859	0.890	0.960	0.972
	5	0.848	0.905	0.830	0.904	0.938	0.952
	10	0.813	0.915	0.938	0.886	0.955	0.960
	15	0.913	0.959	0.915	0.963	0.949	0.977
拔节中期	3	0.573	0.883	0.690	0.885	0.898	0.926
	5	0.822	0.923	0.803	0.925	0.910	0.949
	10	0.588	0.927	0.536	0.918	0.853	0.956
	15	0.682	0.946	0.941	0.947	0.958	0.974
抽穗初期	3	0.594	0.931	0.885	0.929	0.925	0.957
	5	0.733	0.885	0.685	0.870	0.906	0.930
	10	0.603	0.889	0.768	0.884	0.883	0.957
	15	0.689	0.940	0.651	0.947	0.861	0.972
灌浆初期	3	0.800	0.879	0.770	0.862	0.893	0.932
	5	0.725	0.927	0.818	0.908	0.873	0.964
	10	0.588	0.894	0.782	0.890	0.882	0.910
平均值	15	0.600	0.833	0.788	0.823	0.897	0.915
		0.706	0.909	0.791	0.902	0.909	0.950

表 3 40 mm/h 雨强 Horton 模型拟合参数

参数	拔节初期				拔节中期				抽穗初期				灌浆初期			
	3°	5°	10°	15°	3°	5°	10°	15°	3°	5°	10°	15°	3°	5°	10°	15°
i_1	1.00	1.41	1.02	0.94	1.64	1.63	2.51	1.26	1.28	1.89	1.71	1.57	1.46	1.22	1.37	1.29
i_c	0.49	0.31	0.27	0.19	0.44	0.37	0.32	0.27	0.46	0.43	0.40	0.32	0.50	0.47	0.42	0.36
k	0.94	0.14	0.10	0.11	0.17	0.13	0.26	0.11	0.08	0.16	0.14	0.17	0.10	0.13	0.11	0.14
R^2	0.96	0.94	0.96	0.95	0.90	0.91	0.85	0.96	0.93	0.91	0.88	0.86	0.89	0.87	0.88	0.90

表 4 80 mm/h 雨强 Horton 模型拟合参数

参数	拔节初期				拔节中期				抽穗初期				灌浆初期			
	3°	5°	10°	15°	3°	5°	10°	15°	3°	5°	10°	15°	3°	5°	10°	15°
i_1	2.58	2.18	1.82	2.03	2.30	2.40	2.02	2.21	2.61	2.20	2.65	2.27	2.98	2.27	2.01	2.55
i_c	0.61	0.49	0.16	0.31	0.51	0.53	0.27	0.28	0.68	0.70	0.60	0.41	0.84	0.82	0.60	0.61
k	0.13	0.11	0.07	0.13	0.09	0.09	0.07	0.10	0.08	0.10	0.11	0.10	0.11	0.10	0.08	0.11
R^2	0.97	0.95	0.96	0.98	0.93	0.95	0.96	0.97	0.96	0.93	0.96	0.97	0.93	0.96	0.91	0.92

表 5 Kostiakov 模型拟合参数

生育期	坡度/(°)	40 mm/h			80 mm/h		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
拔节初期	3	1.354	0.317	0.859	2.996	0.431	0.890
	5	1.353	0.395	0.830	3.161	0.495	0.904
	10	1.511	0.444	0.938	4.251	0.694	0.886
	15	1.453	0.540	0.915	3.068	0.611	0.963
拔节中期	3	1.105	0.251	0.690	4.045	0.533	0.885
	5	1.503	0.373	0.803	4.480	0.547	0.925
	10	0.977	0.303	0.536	5.382	0.708	0.918
	15	1.954	0.524	0.941	4.906	0.721	0.947
抽穗初期	3	1.610	0.319	0.885	4.246	0.465	0.929
	5	1.094	0.245	0.685	2.683	0.352	0.870
	10	1.404	0.332	0.768	3.579	0.467	0.884
	15	1.131	0.340	0.651	4.537	0.620	0.947
灌浆初期	3	1.219	0.226	0.770	3.055	0.322	0.862
	5	0.967	0.189	0.818	2.686	0.309	0.908
	10	1.335	0.301	0.782	3.096	0.416	0.890
	15	1.160	0.314	0.788	3.262	0.441	0.823

3 讨论

本研究发现,不同坡度谷子坡耕地的土壤入渗动态变化过程基本一致,均表现为先下降后稳定波动,入渗速率与时间呈显著负相关关系,这与刘畅等^[16]研究结果一致。随着降雨历时的延长,雨滴击溅形成的土壤细颗粒堵塞土壤孔隙,形成土壤结皮,降低土壤入渗性能,增加径流量,进而降低土壤入渗速率。坡度对土壤入渗性能具有显著影响,随坡耕地坡度增大,坡面初始产流时间提前,这与吴发启等^[13]研究结果一致。随坡度增大,土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率减小,且坡度增加使土壤入渗过程更快达到稳定波动状态,这与赵西宁等^[11]研究结果一致。坡度的增加,导致水流沿坡面方向的重力分力增加,进而增加坡面流速,加快径流的形成,使得土壤稳定入渗速率、平均入渗速率和土壤累积入渗量减小。在关中地区坡耕地上进行土地利用时,应积极创造微地形,通过施行不同的耕作措施(如等高耕作、人工锄耕、人工掏挖等)调节地表糙度,尽可能地减缓坡面,改善土壤入渗性能,增加土壤水分入渗,从而减轻水土流失。

谷子生长可明显增加坡面稳定入渗速率、平均入渗速率和累积入渗量,在一定雨强和坡度条件下,随谷子生育期的延长坡面土壤入渗性能表现为拔节初期<拔节中期<抽穗初期<灌浆初期。这主要是由于作物的生长发育过程可以改善土壤结构,作物根系穿透土壤产生的孔隙可以扩大水分渗透通道,从而增强坡耕地土壤入渗能力。与裸坡相比,各坡度坡面的稳定入渗速率、平均入渗速率及累积入渗量均明显增加,这与吴佳等^[25]研究结果一致。这主要是因为谷

子冠层对降雨具有截留和分流作用,且谷子根系可以增加土壤孔隙,进而增加土壤入渗能力^[26],抑制坡面土壤物理结皮发育,从而改善坡面土壤的入渗性能^[27]。作物覆盖可以有效改善土壤的入渗性能^[16],其防蚀作用是地上部分截留拦蓄和地下根系固结土壤共同作用的结果^[20]。在作物收获后,可以通过增加地表覆盖—留茬来调节土壤地表状况以减轻土壤侵蚀,留茬覆盖处理的坡耕地能够有效减少径流和泥沙损失,增加土壤入渗。

不同坡度谷子坡耕地土壤入渗过程的拟合结果显示,Horton 模型对研究区谷子坡耕地土壤水分入渗动态变化过程具有较好的适用性,40,80 mm/h 雨强条件下决定系数(*R*²)的平均值分别为 0.909,0.950,且模型拟合参数具有物理意义,拟合所得模型参数值初始入渗速率(*i*₁)、稳定入渗速率(*i*_∞)的变化规律与实际入渗过程中的变化规律一致,是研究土壤时段入渗速率的较好模型。Kostiakov 模型拟合效果次之,模型具有一定的局限性,有些参数值拟合不符合实际入渗规律,且当 *t* 趋于 0 时入渗速率 *i*(*t*) 趋于无穷大,当 *t* 趋于无穷大时入渗速率 *i*(*t*) 趋于 0,只有在水平吸湿情况下才出现,垂直入渗条件下显然不符合实际情况。Philip 模型虽然具有一定的物理基础,但是对入渗过程的拟合效果较差,这与已有学者^[26]的研究结果一致,模型拟合的决定系数(*R*²)在 3 个模型中最低,且一些处理的土壤入渗过程经过拟合得到的稳定入渗速率(*i*_∞)为负值,该模型对谷子坡耕地土壤入渗过程适宜性较差^[28-29]。本研究表明,Horton 模型对谷子坡耕地入渗过程的拟合效果最好,且模型拟合参数具有物理意义,适宜性更强。

4 结 论

(1)不同坡度谷子坡耕地的土壤入渗性能存在明显差异,随着坡度增加,土壤入渗能力下降,与 3°相比,15°坡耕地土壤稳定入渗速率、平均入渗速率及累积入渗量分别减小 30.76%~52.38%,21.28%~37.50%,22.51%~43.55%。

(2)坡度相同时,谷子生育期显著影响坡耕地入渗特征,与拔节初期相比,灌浆初期时土壤稳定入渗速率、平均入渗速率及累积入渗量分别增加 23.81%~80.00%,20.83%~40.00%,17.84%~54.10%,表现为拔节初期<拔节中期<抽穗初期<灌浆初期。

(3)采用 3 种入渗模型拟合谷子坡耕地土壤入渗过程, R^2 值从大到小依次为 Horton 模型、Kostiakov 模型、Philip 模型,Horton 模型的拟合优度与其他 2 种模型相比最好,且模型拟合参数具有物理意义,对谷子坡耕地土壤实际入渗过程的适用性更好。

参考文献:

- [1] 程艳辉.红壤区坡面径流调控关键技术与模式的适用性研究[D].武汉:华中农业大学,2010.
- [2] 刘金荣,谢晓蓉.河西走廊生态环境特征与可持续农业发展对策[J].农业环境与发展,2001(3):38-39.
- [3] 魏瑶瑶,王俊,张永旺,等.黄土高原不同植被类型土壤入渗特征研究[J].延安大学学报,2021,40(2):16-20.
- [4] Parchami-Araghi F, Mirlatifi S M, Dashtaki S G, et al. Point estimation of soil water infiltration process using Artificial Neural Networks for some calcareous soils[J]. Journal of Hydrology, 2013, 481: 35-47.
- [5] 肖婧,王兵.黄土丘陵区不同坡度撂荒地入渗特征影响因素试验研究[J].水土保持学报,2019,33(6):136-142.
- [6] Vaezi A R, Ahmadi M, Cerda A. Contribution of rain-drop 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.
- [7] 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.
- [8] 李莉,孟杰,杨建振,等.不同植被下生物结皮的水分入渗与水土保持效应[J].水土保持学报,2010,24(5):105-109.
- [9] 张侃侃,卜崇峰,高国雄.黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J].干旱区研究,2011,28(5):808-812.
- [10] 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.
- [11] 赵西宁,吴发启.土壤水分入渗的研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42-45.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 李明森.藏北高原草地资源合理利用[J].自然资源学报,2000,15(4):335-339.
- [15] 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.
- [16] 刘畅,张建军,张海博,等.晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J].水土保持学报,2021,35(5):101-107.
- [17] 陈科兵,吴发启,姚冲.黄土高原南部地区人工模拟暴雨条件下不同坡度谷子坡耕地产流产沙过程[J].水土保持学报,2021,35(3):90-95,103.
- [18] 成婧,吴发启,路培,等.玉米苜蓿间作的蓄水保土效益试验研究[J].水土保持研究,2012,19(3):54-57.
- [19] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.黄土丘陵沟壑区典型农作物产流产沙效应研究[J].水土保持研究,2020,27(2):99-103,111.
- [20] 杨晓芬,吴发启,马波,等.黄土坡耕地玉米作物的防蚀作用研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(10):97-102.
- [21] 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.
- [22] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2):197-205.
- [23] Angers D A, Caron J. Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks[J]. Biogeochemistry, 1998, 42(1/2):55-72.
- [24] 徐敬华,王国梁,陈云明,等.黄土丘陵区退耕地土壤水分入渗特征及影响因素[J].中国水土保持科学,2008,6(2):19-25.
- [25] 吴佳,王林华,李占斌,等.中小雨强下谷子坡地的降雨入渗特征模拟[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(6):228-234.
- [26] 刘战东,高阳,段爱旺,等.麦田降雨产流过程的影响因素[J].水土保持学报,2012,26(2):38-44.
- [27] 马波,耿晓晨,马璠,等.模拟降雨条件下谷子和冬小麦植株对降雨再分配过程的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):207-214.
- [28] 王幼奇,阮晓晗,白一茹,等.不同种植年限压砂地土壤水分入渗过程及模型分析[J].排灌机械工程学报,2022,40(10):1048-1055.
- [29] 王幼奇,包维斌,白一茹,等.生物炭对黑垆土土壤水分运移特征参数影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(3):292-297.