

基于 Philip 模型的坡面入渗参数对 坡度-雨强-坡长的响应特征

杨佳¹, 李书琪¹, 张风宝^{1,2}, 刘颖¹, 曹钟璇²,
李玄添¹, 周春红¹, 申楠^{1,2}, 杨明义^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,陕西杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘要: [目的] Philip模型是描述土壤入渗的经典模型,其核心通过引入吸渗率(S)和稳渗率(A)2个关键参数,分别以表征降雨初期土壤依靠基质势的快速吸水能力,及降雨后期土壤孔隙饱和后,依靠重力势的稳定渗水能力。然而,该模型未充分考虑坡面地形及降雨强度等条件的影响,在坡面次降雨入渗模拟中存在偏差。基于此,通过研究基于 Philip 模型的坡面入渗参数对坡度-雨强-坡长的响应特征及影响机制,进而构建相应的修正模型,有助于提升黄土区次降雨入渗模拟精度,为水土流失防治、生态修复工程中的水资源调控提供科学支撑。[方法] 以黄绵土坡面为研究对象,通过室内模拟降雨试验,系统分析坡度(17.63%~57.74%)、雨强(0.800~2.835 mm/min)和坡长(0.4~2.0 m)对 Philip 模型参数的影响并进行修正。[结果] 1) Philip 模型模拟次降雨过程坡面土壤水分入渗表现出良好的拟合效果($R^2 > 0.946$),但不同坡长、雨强和坡度下模型拟合参数变异性较大。2) 稳渗率随雨强增加而增大,随坡度和坡长增加呈递减趋势;吸渗率随雨强和坡度呈增加趋势,随坡长呈递减趋势。3) 雨强对稳渗率和吸渗率变化贡献率分别为 83.99% 和 57.35%。坡度增大降低雨强对稳渗率的影响,雨强增大增强坡长对稳渗率的影响。当坡长 < 1.6 m 时,坡长的增加能够促进雨强对吸渗率的影响,抑制坡度对吸渗率的影响。4) 以 Philip 模型为基础,引入坡度、坡长及降雨强度等因子,构建次降雨过程坡面土壤水分入渗修正模型,显著提高模拟精度($R^2 = 0.880$)。[结论] Philip 模型虽能高精度再现次降雨坡面入渗过程,但模型参数对坡面条件响应强烈,且规律一致,稳渗率随雨强增大而升高,随坡度与坡长增加而降低;吸渗率随雨强、坡度增大而升高,随坡长增加而降低。因子贡献度以雨强对参数变异性的解释度最高,为 Philip 模型的修正提供关键依据,且修正后模型模拟精度显著提升。

关键词: 坡面入渗; 模拟降雨; Philip 模型; 稳渗率; 吸渗率

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)03-0140-10

Response Characteristics of Slope Infiltration Parameters Based on Philip Model to Slope Gradient, Rainfall Intensity, and Slope Length

YANG Jia¹, LI Shuqi¹, ZHANG Fengbao^{1,2}, LIU Ying¹, CAO Zhongxuan²,

LI Xuantian¹, ZHOU Chunhong¹, SHEN Nan^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The Philip model is a classic model for describing soil infiltration. Its core lies in introducing

收稿日期: 2025-10-17

修回日期: 2025-11-27

录用日期: 2025-12-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(42361144707, 42177338); 国家重点研发计划项目(2022YFF1300805); 中央高校基本科研业务费专项(2023HHZX001)

第一作者: 杨佳(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 2058006407@qq.com

通信作者: 张风宝(1980—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀及其环境效应研究。E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

two key parameters-sorptivity (S) and steady infiltration rate (A)-to characterize the soil's rapid water absorption capacity driven by matric potential during the early stage of rainfall and its stable water infiltration capacity driven by gravitational potential after soil pores become saturated during the later stage, respectively. However, the model does not fully account for the effects of slope topography and rainfall intensity, leading to deviations in simulating slope infiltration during individual rainfall events. Therefore, by investigating the response characteristics and influencing mechanisms of slope infiltration parameters based on the Philip model to slope gradient, rainfall intensity, and slope length, and subsequently developing a corresponding modified model, the simulation accuracy of individual rainfall infiltration in the Loess Plateau region can be improved, thereby providing scientific support for water resource management in soil and water conservation and ecological restoration projects. [Methods] Taking loessal soil slopes as the research object, laboratory simulated rainfall experiments were conducted to systematically analyze the effects of slope gradient (17.63%–57.74%), rainfall intensity (0.800–2.835 mm/min), and slope length (0.4–2.0 m) on the parameters of the Philip model, and corresponding modifications were made. [Results] 1) The Philip model exhibited good fitting performance in simulating soil water infiltration on slopes during individual rainfall events ($R^2 > 0.946$). However, the fitted parameters showed significant variability under different slope lengths, rainfall intensities, and slope gradients. 2) The steady infiltration rate (A) increased with rainfall intensity but showed a decreasing trend with increasing slope gradient and slope length. Sorptivity (S) exhibited an increasing trend with rainfall intensity and slope gradient but a decreasing trend with slope length. 3) Rainfall intensity contributed 83.99% and 57.35% to the variations in the steady infiltration rate and sorptivity, respectively. An increase in slope gradient diminished the influence of rainfall intensity on the steady infiltration rate, while an increase in rainfall intensity enhanced the influence of slope length on the steady infiltration rate. When the slope length was less than 1.6 m, increasing slope length promoted the effect of rainfall intensity on sorptivity while suppressing the effect of slope gradient on sorptivity. 4) Based on the Philip model, a modified model for slope soil water infiltration during individual rainfall events was constructed by introducing factors such as slope gradient, slope length, and rainfall intensity, which significantly improved the simulation accuracy ($R^2 = 0.880$). [Conclusion] Although the Philip model can accurately reproduce the slope infiltration process during individual rainfall events, its parameters respond strongly to slope conditions, showing consistent patterns. The steady infiltration rate increases with rainfall intensity but decreases with increasing slope gradient and slope length, and sorptivity increases with increasing rainfall intensity and slope gradient but decreases with increasing slope length. Among the factors, rainfall intensity has the highest explanatory power for parameter variability, providing a key basis for the modification of the Philip model. The modified model significantly improves the simulation accuracy.

Keywords: slope infiltration; simulated rainfall; Philip model; steady infiltration rate; sorptivity

Received: 2025-10-17

Revised: 2025-11-27

Accepted: 2025-12-15

Online(www.cnki.net): 2026-01-16

土壤入渗是指降雨或灌溉水通过坡面土壤孔隙进入土壤内部的过程,与地表产流和土壤侵蚀强度密切相关^[1]。土壤入渗能力直接决定降雨雨量中入渗量和产流量的分配比例^[2],提高土壤入渗,能够增加土壤水分储存,减少地表径流并减小土壤侵蚀^[3]。黄土区的坡面土壤水分入渗是调控区域水文循环与防治水土流失的核心环节,其模拟精度直接影响农业管理、生态修复与灾害预警的效果。次降雨条件下,坡面入渗过程受坡度、雨强、坡长等多因素交叉

作用,表现出复杂的动态变化规律,使得传统 Philip 入渗模型的适用范围与模拟效果面临较大挑战。Philip 入渗模型虽在多个区域和场景中展现出良好模拟能力,但针对黄土区独特的土壤质地(黄绵土)与坡面环境,其模型参数能否稳定适配坡度、雨强、坡长的动态变化,以及能否通过参数优化进一步提升次降雨入渗模拟精度,仍需深入且系统地验证与探究。因此系统研究 Philip 入渗模型对多情景下坡面土壤入渗响应特征可明确评估降雨在坡面的分配

情况及转化规律,进而有针对性地应用工程措施和生物措施提高坡面入渗能力和降水资源利用率,控制坡面水土流失,促进区域水循环的可持续调控^[4-5]。

坡面土壤水分入渗过程受降雨、坡度、坡长等因子及其交互作用的影响,但各因子的作用规律尚未达成共识。DUNNE等^[6]研究指出,入渗能力随雨强增强而提升;而JOURGHOLAMI等^[7]研究发现,雨强超阈值后会因土壤孔隙堵塞而降低入渗;在坡度方面,郝春红等^[8]提出坡度对累积入渗量的影响并不显著;JOURGHOLAMI等^[7]则指出,存在临界坡度,超阈值后入渗能力下降。坡长的影响更具争议,既有促进入渗^[9]、抑制入渗^[10]的结论,也有研究^[11]认为无显著关联。这些多因子交互作用对入渗的影响同样得到大量关注^[12-16]。如ZHANG等^[13]和SIMELANE等^[16]研究发现,陡坡与高雨强组合会减少入渗量;陈俊杰等^[17]则研究指出,坡长增长减弱坡度对坡面入渗影响,而雨强增强坡度对入渗的作用。上述研究表明,雨强、坡度和坡长显著影响坡面土壤入渗过程,但目前对各因子的作用规律未形成共识,核心原因之一在于各因子的交互效应对入渗的影响机制往往更为复杂^[18]。由此可见,单一因子的研究存在难以解释实际场景中入渗差异的局限性,多因素组合条件下的土壤入渗过程解析还需进一步研究。

Philip模型是目前使用较多的土壤水分入渗模拟模型,属于半理论半经验性,能较好地描述土壤的垂直入渗过程^[19-20]。1957年PHILIP^[21]通过分离吸渗率和稳渗率,构建具有明确物理意义的入渗模型。但是目前针对Philip模型方面的研究,多集中在均质土壤或单一因子的影响方面^[20]。如PHILIP^[22]研究提出,坡度增加会导致Philip模型的吸渗率下降,而稳渗率则会呈非线性增长,且稳渗率随雨强增大而显著增大;豆静静等^[23]基于过筛均质黄绵土的研究表明,当初始含水率越高,稳渗率对坡度变化更加敏感;WU等^[24]提出,吸渗率随坡长增加呈线性下降;黄煜等^[25]研究发现,稳渗率随坡长增加呈指数式增长;而郭晓滕等^[26]通过控制土壤体积质量均一,提出稳渗率随坡长增加呈对数增长,且长坡长情况下Philip模型的模拟精度降低,需引入坡长修正系数进行参数调整;VENKATA等^[27]通过分析坡度和雨强对参数的影响发现,在高雨强条件下,随着坡度的增加吸渗率的下降幅度变大,且稳渗率随着雨强的增加呈指数增长。综上所述,现有研究关于降雨强度、坡度和坡长等单一因子对Philip模型参数(S和A)的影响已积累丰富但存在争议。尽管Philip模型在均质土壤和平地条件下具有良好的模拟性能^[28],但针对坡面环境下多

因子交互作用对吸渗率和稳渗率影响的系统性研究仍显不足,各参数在多因子的中介、协同或拮抗作用下的响应特征尚待进一步整合与验证,从而有助于建立具有环境针对性的模型修正策略与方法,提升模型适用性。

基于此,本研究以Philip模型的理论框架为基础,结合不同坡度、坡长和雨强的降雨过程试验数据,深入探究坡度、雨强和坡长对Philip模型稳渗率和吸渗率的影响,系统分析模型参数的变化特征;并据此对Philip入渗模型进行针对性修正,提升模型对坡面次降雨入渗过程的表征能力与模型普适性,为坡面入渗过程及产流的精准预报提供基础支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究采用人工模拟降雨系统开展试验。试验设置5个坡长梯度(0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 m)、5个雨强梯度(0.800、1.040、1.700、2.475、2.835 mm/min)、5个坡度梯度(17.63%、26.79%、36.40%、46.63%、57.74%)和1种土壤类型(黄绵土)。采用全因子试验设计方法,共计125个试验组合,每个试验组合均进行2次重复,第1次降雨后替换新土后进行第2次重复降雨试验,累计进行250场模拟降雨试验。数据分析阶段取2次重复试验结果的平均值进行处理。

1.2 供试土壤

本研究供试土壤为黄土高原典型黄绵土,采自陕西省延安市安塞区(36°51'30"N,109°19'23"E)的旱作耕地表层(0~25 cm)。土壤机械组成分析显示,其砂粒(粒径0.05~1 mm)占比38.72%,粉粒(粒径0.002~0.05 mm)占比45.59%,黏粒(粒径<0.002 mm)占比15.69%,有机质质量分数为0.53%。试验前,土壤经自然风干后过4 mm筛,以去除石块、杂草等杂质;之后称取一定量过筛干土平铺于铝盒内,使用酒精燃烧法测定水分质量分数。若土壤水分质量分数高于目标水分质量分数(14%),则继续风干,并重复测定土壤水分质量分数;若土壤水分质量分数低于目标水分质量分数(14%),则按目标水分质量分数计算需补充的水量,均匀喷洒在土壤表面,然后密封,于阴凉处静置24 h后随机取3个土样,继续测定实际水分质量分数,以实际水分质量分数与目标水分质量分数间的误差控制在±0.5%以内为标准,直到将土壤初始质量水分质量分数调控至14%左右时才开始装填土壤进行试验。

1.3 土槽准备

本试验采用5种不同长度底部带孔的金属槽作为装土容器,槽体宽度为0.4 m、深度为0.25 m,长度

分别为0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 m,各金属土槽的坡度调节范围0~84%。土壤装填采用分层压实方法,以5.5 cm为单位厚度,共分4层装填,总装填深度达22 cm。控制每层土壤体积质量为1.3 g/cm³,装填后土壤表面低于槽体边缘约3 cm。为减少土层间界面效应的影响,每层土壤装填后均对其接触面进行拉毛处理。表层土壤则进行压实平整处理,以降低微地形对试验结果的干扰。

1.4 降雨过程

室内模拟降雨试验在水土保持与荒漠化整治全国重点实验室进行。试验采用DIK-6000型降雨器,其雨滴中位直径为2.2 mm,有效降雨覆盖面积为2 m×3 m,降雨高度为8.7 m;整个降雨过程中,降雨均匀度始终维持在85%以上,接近天然降雨条件。每场模拟降雨时长设定为60 min,降雨开始前进行雨强率定,降雨开始后记录初始产流时间。径流产生后的前15 min内,分别每隔1、2、3、4、5 min用经编号并称重后的径流瓶收集1个径流样,之后每5 min收集1次,每场降雨累计收集15个径流样品。降雨结束后使用烘干称重法获取径流量和泥沙量。

1.5 模型拟合

Philip模型结合经验性和理论性特征,具有明确的物理意义。该模型的入渗公式仅包含2个参数,形式简洁且计算简便,作为描述土壤水分入渗过程的模型之一,得到广泛的认可与应用。基于Philip模型,本研究对全部125组模拟降雨试验的入渗数据进行2种拟合分析:一是针对每次独立降雨过程的数据分别进行单独拟合;二是对所有降雨过程数据的统一拟合。Philip入渗模型^[21]为:

$$I(t) = St^{0.5} + At \quad (1)$$

式中: I 为累积入渗量,即自入渗开始至 t 时刻的入渗

总量,mm; t 为时间,min; S 为土壤吸渗率,mm/min^{0.5}; A 为稳渗率,mm/min。

1.6 数据处理

本研究基于水量平衡和分段累加原理,在获得降雨量与径流量的基础上,采用Excel 2019软件计算入渗率和累积入渗量;后通过Tablecurve 2D软件对模拟降雨数据进行Philip模型参数优化拟合,并基于参数集计算理论预测值。运用SPSS 26软件构建参数与多影响因子的非线性回归模型并完成可视化表征。采用R语言,进行变差分解,量化影响因子的贡献。基于Excel 2019软件计算决定系数(R^2)、平均绝对百分数误差(MAPE)、均方根误差(RMSE)、均方误差(MSE)、泰尔不等系数(TIC)5项关键指标来定量评价模型拟合性能。采用Origin 2025软件和R语言进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同试验条件下 Philip 模型拟合效果及相关参数

在不同降雨强度、坡长及坡度条件下,利用Philip入渗模型对单次降雨过程坡面土壤水分入渗累积量进行模拟,结果显示,模型模拟效果极佳,拟合方程的确定系数(R^2)为0.946~1.000,平均值为0.999。用全部125组试验数据整体进行拟合时,模型拟合优度效果显著下降,拟合方程的 R^2 降低至0.550。

125组次降雨过程坡面土壤水分入渗模拟稳渗率和吸渗率的分布特征见图1。稳渗率为0.200~1.470,其平均值为(0.650±0.340) mm/min,最大值为1.470 mm/min,变异系数为0.513,其中84%的值为0.2~1.0;参数 S 为0.460~2.170,平均值为(1.420±0.310) mm/min^{0.5},最大值为2.170 mm/min^{0.5},变异系数为0.217,其中80.8%的值为1.0~1.8。

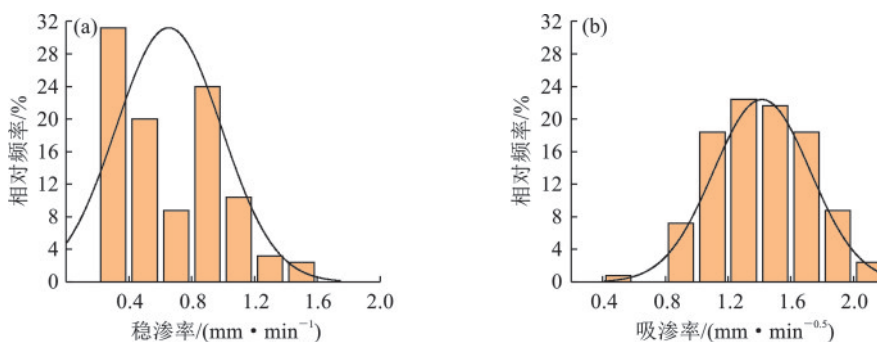


图1 Philip模型参数的相对频率

Fig.1 Relative frequency of Philip model parameters

2.2 坡度、雨强和坡长对稳渗率的影响

方差分析(表1)显示,坡度、雨强和坡长对参数 A 影响显著($p < 0.05$)。由图2可知,随坡度增大,稳渗

率呈下降趋势,但差异均未达到显著水平($p > 0.05$)。雨强与稳渗率呈显著正相关($p < 0.05$),稳渗率随雨强增大而递增,小雨强与大雨强间存在显著差异。

稳渗率随坡长增加呈下降的趋势,当坡长 ≤ 0.8 m时快速递减,坡长 > 0.8 m时呈波动变化。0.4 m坡长与0.8、1.2、1.6、2.0 m坡长下稳渗率差异均达到显著水平($p < 0.05$)。

表 1 不同因子对模型参数的方差分析

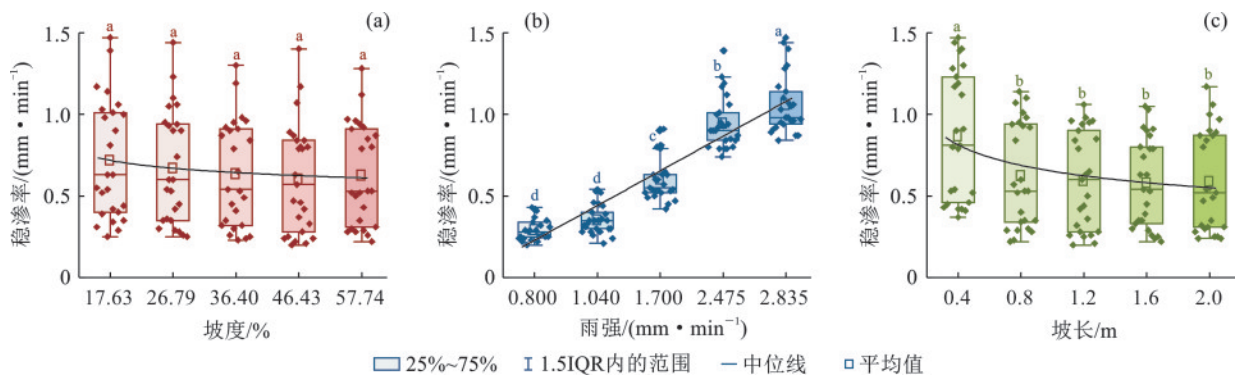
Table 1 Analysis of variance of model parameters under different factors

参数	因子	R^2	P	df	F
A	坡度	0.963	0	4.0	10.873
	雨强		0	4.0	643.899
	坡长		0	4.0	81.396
	误差			112	
S	坡度	0.687	0.007	4.0	3.761
	雨强		0	4.0	51.426
	坡长		0	4.0	6.183
	误差			112	

采用变差分解方法量化不同试验条件下坡度、雨强和坡长对稳渗率的影响。由图 3 可知,雨强对稳渗率影响的贡献率最大(83.99%),坡度和坡长的贡献率分别为 1.11% 和 6.45%,因子间的交互作用对稳渗率的影响不明显。随坡度增加,雨强贡献率先降后增;坡长的贡献率则呈先增后降的趋势,在坡度 36.4% 时达到最大(7.69%)。随雨强增加,坡长的贡献率由 34.39% 增加至 50.21%,在 2.835 mm/min 的雨强条件下又呈降低趋势;坡度的贡献率为 3.95%~11.33%。随坡长增加,雨强的贡献率由先降后增,最低点在 1.2 m 坡长下;坡度的贡献率较低,为 0.89%~2.54%。

以坡度(S_p)、雨强(R)和坡长(L)为自变量,以稳渗率为因变量,采用多元非线性回归分析对数据进行拟合拟合方程为:

$$A = 0.994 \times S_p^{-0.132} \times R^{1.062} \times L^{-0.256} \quad (R^2 = 0.957, n = 125) \quad (2)$$



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 Philip 模型中稳渗率的多因素

Fig.2 Multiple factors of steady infiltration rate in Philip model

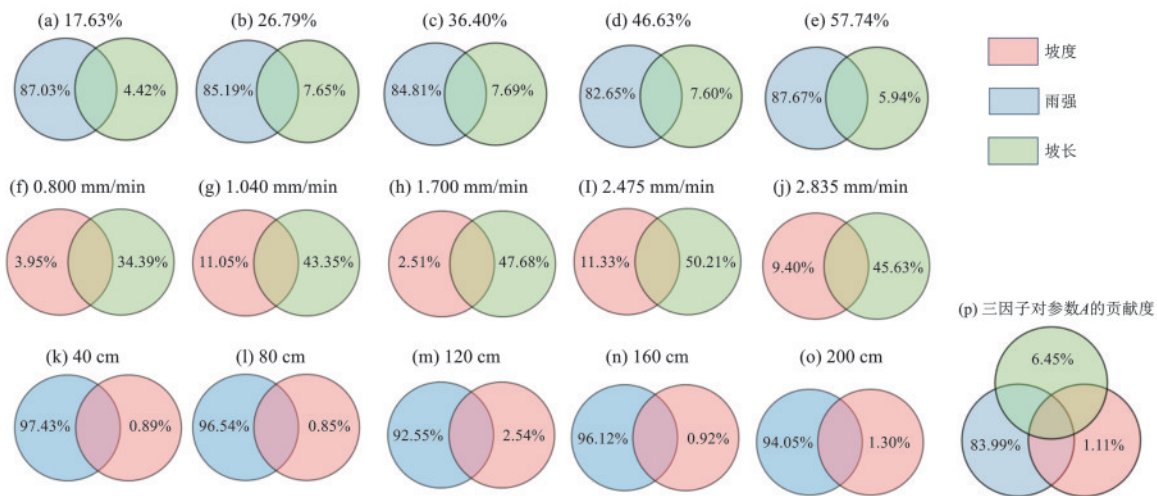


图 3 坡度、雨强与坡长对稳渗率的贡献率

Fig.3 Contribution rates of slope gradient, rainfall intensity, and slope length to steady infiltration rate

2.3 坡度、雨强和坡长对吸渗率的影响

由表 1 可知,坡度、雨强和坡长显著影响吸渗率

($p < 0.05$)。由图 4 可知,随着坡度增大,吸渗率呈上升趋势,在 17.63% 和 57.74% 坡度下吸渗率差异显

著。雨强与吸渗率呈显著正相关,0.800、1.040 mm/min 雨强下吸渗率无显著差异,但二者均与其他雨强下

的吸渗率差异显著。随着坡长增加,吸渗率呈下降趋势,但只有 0.8、1.6 m 坡长下的吸渗率差异显著。

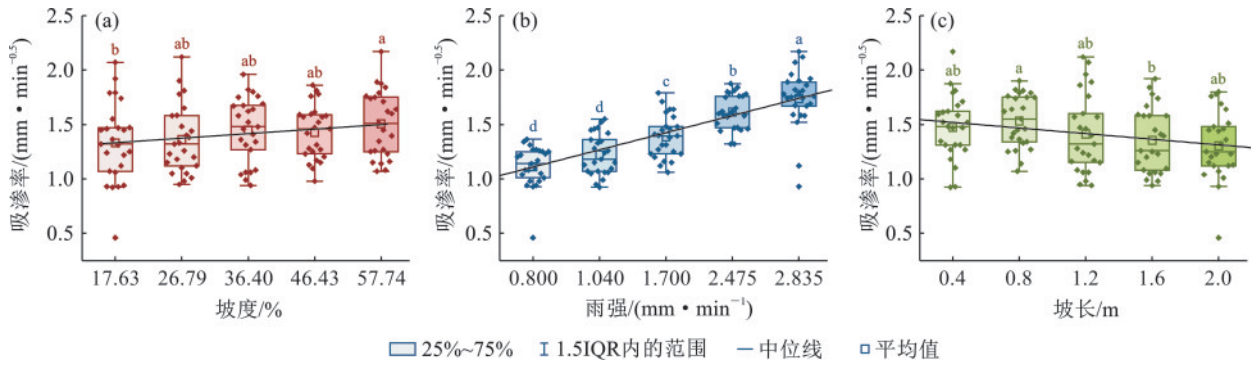


图 4 Philip 模型吸渗率的多因素
Fig.4 Multiple factors of sorptivity in Philip model

由图 5 可知,变差分解结果显示,雨强对参数 S 的影响最大(57.35%),其次为坡度(3.65%)和坡长(5.61%),因子交互作用对参数 S 的影响不明显。随坡度增加,雨强对参数 S 变化的贡献率由 45.80% 增至 70.96%,而坡长的贡献率由 11.60% 降低至 1.83%。随着雨强增大,坡度和坡长的贡献率均呈先

降后升再降的趋势,且坡长对参数 S 的作用高于坡度。当坡长增加时,雨强对参数 S 的贡献率呈现先增加后降低的趋势,而坡度的贡献率呈现先降低后增加趋势;当坡长 ≤ 1.6 m 时,雨强主导着参数 S 的变化,当坡长 > 1.6 m 时,坡度和雨强的贡献相近,共同主导参数 S 的变化。

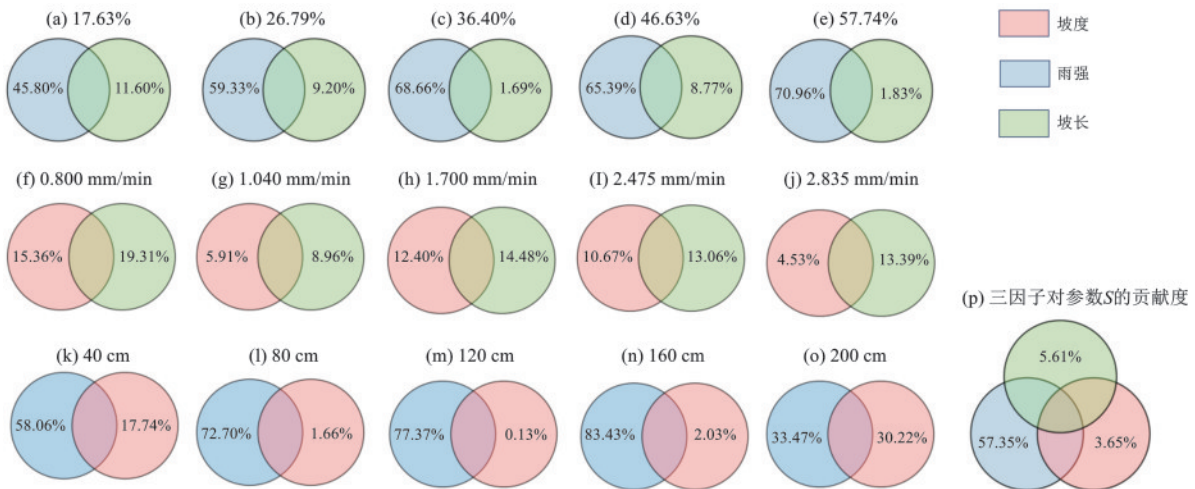


图 5 坡度、雨强与坡长对吸渗率的贡献率
Fig.5 Contribution rates of slope gradient, rainfall intensity, and slope length to sorptivity

以坡度、雨强和坡长为自变量,以吸渗率为因变量,采用多元非线性回归分析对数据进行分析,关系式为:

$$S = 1.87 \times S_p^{0.095} \times R^{0.344} \times L^{-0.075} \quad (R^2 = 0.645, n = 125) \quad (3)$$

2.4 基于坡度、雨强及坡长因子的 Philip 模型修正

为进一步解释各因子对降雨入渗过程的影响,本研究构建融合 Philip 模型与坡度(S_p)、雨强(R)、坡长(L)的综合坡面入渗模型。通过非线性回归方法对模型进行参数优化,最终得到优化公式:

$$I = (St^{0.5} + At) \times (-0.11S_p + 1.104R - 0.096L + 0.327) \quad (R^2 = 0.88, n = 125) \quad (4)$$

修正模型的吸渗率为 0.460 mm/min^{0.5},稳渗率为 0.402 mm/min。相比于公式(1)的 Philip 模型,修正模型的模拟精度 R^2 由 0.550 提升至 0.880,模型 MAPE、RMSE、MSE 及 TIC (13.980、8.490、72.080 与 0.230) 指标表现优于 Philip 模型(MAPE=45.130, RMSE=16.470, MSE=271.210, TIC=0.440)。

由图 6 可知,修正模型的累积入渗量预测值与实际值离散程度更小,结合图中 1:1 线,在实测值较小区间内,该模型显著降低 Philip 模型的离散程度;尽管在实测值较大情况下仍存在一定偏离,但相较于 Philip 模型,其对实测值偏离程度的修正效果亦较为明显。修正模型在不同的条件下其适用性存在差

异。由图 7 可知,修正模型的绝对误差在 26.79% 的坡度下最小,17.63% 坡度下的绝对误差次之,大坡度下绝对误差普遍较大。在雨强为 0.800 mm/min 时,修正模型的绝对误差最小,大雨强下绝对误差普遍较大。绝对误差随着坡长的增大先增加后降低,约在 1.2 m 的坡长下绝对误差最大。随降雨历时增加,

绝对误差普遍增大。绝对误差随着累积入渗量实测值的增大呈非线性增大,且当实测值 > 100 mm 时,绝对误差出现了急剧增大的趋势。综上,修正模型的绝对误差随坡度、雨强、坡长变化而存在差异,且在 26.79%、0.800 mm/min、0.4 m 的降雨条件下拟合效果最优。

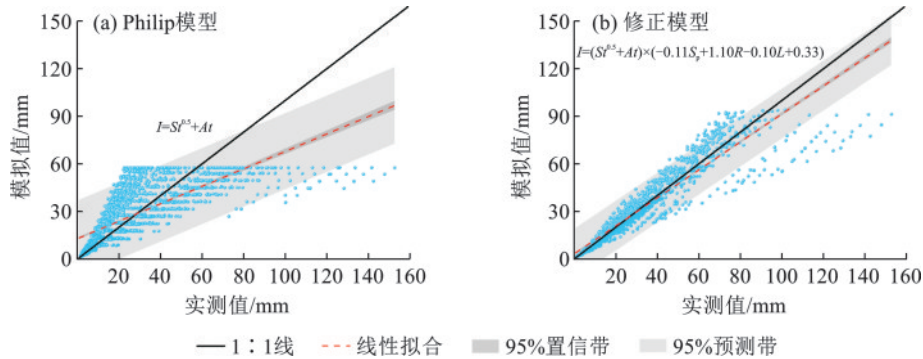


图 6 土壤入渗实测值与 Philip 模型预测值、修正模型预测值的关系

Fig.6 Relationship between measured soil infiltration values and predicted values from Philip model and modified model

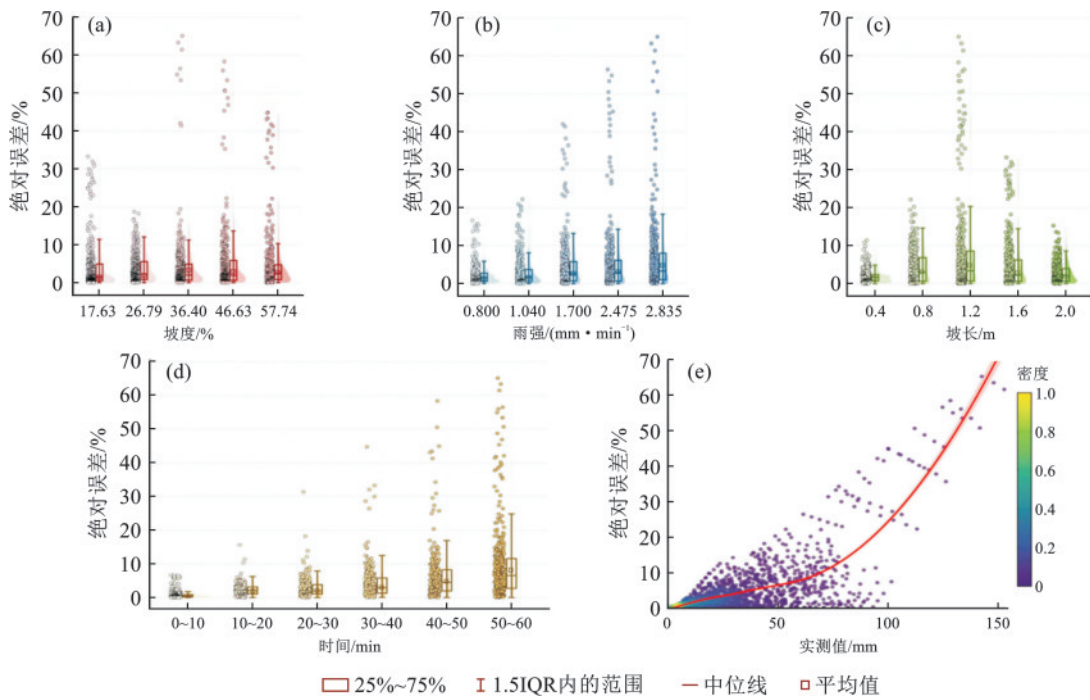


图 7 修正模型在不同因子下的绝对误差分布

Fig.7 Distribution of absolute errors of modified model under different factors

3 讨论

在采用 Philip 模型对坡面降雨入渗过程进行模拟时,模型拟合吸渗率和稳渗率对雨强、坡度及坡长因子表现出显著的响应特征。该现象可归因于 Philip 模型主要适用于平地均质土中的一维垂直入渗(指水分仅沿垂直于土壤表面的单一方向渗透,即竖直向下方向,且渗透过程中无水平方向的水分迁移,同时土壤质地、结构、初始含水率等属性在水平方向上均匀一致),与坡面实际降雨条件下的自然入

渗与积水入渗存在较大差异^[29]。本研究表明,坡度对 Philip 模型参数的影响表现为随坡度增大,稳渗率呈减小趋势,而吸渗率则呈增加趋势,是由于坡度增大缩短径流在坡面停留时间,加速地表径流形成和发展过程^[30],从而引起稳渗率的下降^[31]。同时,坡度增大使坡面实际投影面积减小,单位面积承雨量相应减少^[32],但在降雨初期坡度增大所增强的重力分力对水分初始入渗具有促进作用,且该促进效应超过投影面积减小所产生的抑制效应^[33],最终导致吸渗率逐

渐增大。雨强对模型参数的影响最为显著,其对稳渗率和吸渗率变化的贡献率分别达 83.99% 和 57.35%,是主导模型参数变化的关键因子。李毅等^[34]研究指出,随雨强增大,稳渗率呈下降趋势;然而也有研究^[35]与本文结论一致,表明雨强增大有助于促进水分入渗。主要是由于黄绵土质地疏松,总孔隙度较高且以大孔隙结构为主,具有较强的透水性^[36]。在高雨强条件下,水分可经由大孔隙快速下渗,有效避免表层土壤结皮形成和低雨强下水分缓慢入渗导致的孔隙堵塞^[37],从而促进早期吸渗。大孔隙连通性随水分填充增强,重力主导阶段的导水率也随之增强,最终导致稳渗率增大^[38]。在本研究中,坡长对降雨入渗过程的影响表现出双重机制:一方面,坡长增加可延长径流在坡面上的滞留时间,通过加长径流路径促进土壤入渗^[12];另一方面,坡长增加亦会增大坡面面积与降水总量,进而增加地表径流量及水流流速,对入渗产生抑制作用^[39]。坡长增加对入渗呈双重效应,在 Philip 模型中综合表现为抑制作用占主导,导致稳渗率与吸渗率随坡长增大而递减^[40]。

不同坡度下,雨强是影响稳渗率和吸渗率的主要因素,且对稳渗率的影响大于吸渗率。主要是稳渗率的物理本质使其对雨强作用更敏感,而吸渗率主要受土壤本身属性约束。坡度增大时,坡长对稳渗率的贡献率先增后减,表明存在临界坡度,且超过临界坡度后坡长作用减弱。坡度增大时,参数 S 对坡长的响应较弱,且坡长对参数 S 的贡献率呈波动变化。由于坡长通过改变径流累积量和径流滞留时间,对稳渗率和吸渗率的影响更直接且持久,使得坡长对稳渗率和吸渗率的贡献率大于坡度。雨强增大削弱了坡度对吸渗率的影响,与 XING 等^[41]的研究结果相似,雨强改变坡度对吸渗率的作用机制,且存在关键阈值。雨强增大时,坡长对稳渗率的贡献率增大,说明雨强放大了坡长的“累积效应”,进而增强了坡长对稳渗率的调控作用。因此,坡长通过改变径流的空间分布,间接调节坡度对下渗的作用。雨强通过“溅蚀-冲刷-结皮”三重作用改变土壤表层结构,直接决定稳渗率和吸渗率的大小,且此影响对坡长变化具有一定的依赖性。坡长增加时,雨强对吸渗率的贡献率先增后降,说明长坡长削弱雨强的作用,导致坡度对吸渗率的贡献率增大到与雨强相近,坡长增加强化坡度对吸渗率的作用。坡度对吸渗率的作用随坡长增加呈现先弱后强的动态变化,说明坡长变化改变雨强和坡度对吸渗率的影响程度。综上,坡面降雨入渗过程中 Philip 模型稳渗率和吸渗率的变化是坡度、雨强、坡长动态耦合的结果,其中雨强是核心因子,坡度和坡长的影

响受彼此及自身临界值调控,超过阈值后各因素的作用优先级会发生转变,呈现非线性、阶段性的响应特征。由于 3 个因子间存在交互作用,在本研究中各因子设计阶梯水平中临界值难以被确定为唯一的具体数值,但 Philip 模型稳渗率和吸渗率随坡度、雨强和坡长的变化趋势,及累积入渗量模拟值与实际值的绝对误差等指标显示存在其临界值。后续研究可通过进一步细化各因子的试验水平条件,以逐步确定各条件下的临界值具体数值。

本研究在引入坡度、雨强及坡长因子后,修正后模型的预测值与实测值之间的一致性显著优于原 Philip 模型,表明该修正模型在模拟坡面降雨入渗过程中具有更高的适用性。而在高雨强情况及降雨后期,模拟值呈现系统性偏小,表明当前修正模型在极端降雨条件下的模拟值存在低估,可能归因于 Philip 模型未充分考虑入渗过程的非线性特征及降雨过程产生的土壤侵蚀对入渗过程的潜在影响。当前修正模型尚未通过独立数据验证其普适性,尤其缺乏黄土区野外实测坡面数据及不同土壤类型的验证及应用。未来研究可优先采集黄土丘陵区典型野外坡面的入渗-径流数据,同时引入其他土壤类型开展室内验证试验,进一步明确模型在不同场景下的适用条件及其精确度,为其在水土流失防治、水资源调控等实际工程中的推广应用提供理论支撑。

4 结论

1) Philip 模型在模拟坡面单次降雨入渗过程中具有较高的拟合精度($R^2 > 0.946$),但其稳渗率和吸渗率受坡度、雨强与坡长的显著影响,表现出较大变异性。其中,雨强是主导参数变化的核心因子,对稳渗率和吸渗率变化的贡献率分别达 83.99% 和 57.35%。

2) 稳渗率随雨强增大而显著增大,随坡度与坡长增加呈递减趋势;吸渗率随雨强与坡度增大而增加,随坡长增加呈下降趋势。坡度与坡长对参数的影响存在临界阈值,超过阈值后其作用机制与优先级发生转变。

3) 基于多因子耦合作用,构建了包含坡度、雨强与坡长的 Philip 修正模型,其拟合优度($R^2 = 0.880$)显著优于原模型综合拟合结果($R^2 = 0.550$),且 MAPE、RMSE、MSE、TIC 等评价指标均有所改善,表明修正模型能更准确地模拟次降雨坡面入渗过程。

本研究深化了对 Philip 模型模拟坡面降雨入渗的认识和理解,提出了黄土区多因子条件下针对性的 Philip 修正模型,为促进坡面水文过程模拟精度、因地制宜进行水土流失防控与水资源高效管理提供了理论基础支撑。

参考文献:

- [1] 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.
ZHAO X N, WU F Q. Research progress and review of soil water infiltration [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(1): 42-45.
- [2] CERDÀ A. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain [J]. *Geoderma*, 1996, 69(3/4): 217-232.
- [3] 张灯煜, 冯梦蝶, 徐绮雯, 等. 紫色土区不同农林复合模式土壤入渗特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 114-121.
ZHANG D Y, FENG M D, XU Q W, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors under different agroforestry patterns in purple soil area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 114-121.
- [4] TU N, DAI Q H, YAN Y J, et al. Effects of moss overlay on soil patch infiltration and runoff in karst rocky desertification slope land [J]. *Water*, 2022, 14(21): e3429.
- [5] 王承书, 杨晓楠, 孙文义, 等. 极端暴雨条件下黄土丘陵沟壑区土壤蓄水能力和入渗规律[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 296-306.
WANG C S, YANG X N, SUN W Y, et al. Soil water storage capacity and infiltration under extreme rainstorm conditions in the loess hilly-gully region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 296-306.
- [6] DUNNE T, ZHANG W H, AUBRY B F. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(9): 2271-2285.
- [7] JOURGHOLAMI M, KARAMI S, TAVANKAR F, et al. Effects of slope gradient on runoff and sediment yield on machine-induced compacted soil in temperate forests [J]. *Forests*, 2021, 12(1): e49.
- [8] 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.
HAO C H, PAN Y H, CHEN X, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on infiltration characteristics of Lou soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1040-1044.
- [9] GOVERS G. Rill erosion on arable land in central Belgium: Rates, controls and predictability [J]. *Catena*, 1991, 18(2): 133-155.
- [10] XU X M, ZHENG F L, WILSON G V. Flow hydraulics in an ephemeral gully system under different slope gradients, rainfall intensities and inflow conditions [J]. *Catena*, 2021, 203: e105359.
- [11] AGASSI M, BEN-HUR M. Effect of slope length, aspect and phosphogypsum on runoff and erosion from steep slopes [J]. *Soil Research*, 1991, 29(2): 197-207.
- [12] BRYAN R B, POESEN J. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14(3): 211-231.
- [13] ZHANG J, YOU C F. Water holding capacity and absorption properties of wood chars [J]. *Energy and Fuels*, 2013, 27(5): 2643-2648.
- [14] HE Z M, JIA G D, LIU Z Q, et al. Field studies on the influence of rainfall intensity, vegetation cover and slope length on soil moisture infiltration on typical watersheds of the Loess Plateau, China [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(25): 4904-4919.
- [15] 姚茂宏, 陈铁林, 樊容, 等. 强降雨条件下考虑气压和渗流作用的边坡稳定性[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(6): 739-745
YAO M H, CHEN T L, FAN R, et al. Slope stability considering air pressure and seepage under heavy rainfall conditions [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2022, 56(6): 739-745.
- [16] SIMELANE M P Z, SOUNDY P, MABOKO M M. Effects of rainfall intensity and slope on infiltration rate, soil losses, runoff and nitrogen leaching from different nitrogen sources with a rainfall simulator [J]. *Sustainability*, 2024, 16(11): e4477.
- [17] 陈俊杰, 孙莉英, 刘俊体, 等. 不同坡长与雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 1-5.
CHEN J J, SUN L Y, LIU J T, et al. Effects of slope gradient on rill erosion under different slope lengths and rainfall intensities [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(2): 1-5.
- [18] 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.
- [19] 巩炜, 胡广录, 付鹏程, 等. 干旱区沙漠-绿洲过渡带固沙植物的土壤水分入渗特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 200-208.
GONG W, HU G L, FU P C, et al. Soil infiltration characteristics of sand-fixing plants in the desert-oasis ecotone of an arid region [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(5): 200-208.
- [20] 原林虎. PHILIP 入渗模型参数预报模型研究与应用 [D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
YUAN L H. Research and application of PHILIP infiltration model parameter prediction model [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.
- [21] PHILIP J R. The theory of infiltration [J]. *Soil Science*, 83(5): 345-358.
- [22] PHILIP J R. A linearized solution of the slope crest infiltration problem [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(4): 1121-1132.
- [23] 豆静静, 郑志伟, 高卓卓. 变化初始含水率条件下土壤入渗特性试验及模拟研究[J]. 天津农学院学报, 2023, 30

- (2):11-17.
- DOU J J, ZHENG Z W, GAO Z Z. Experiment and simulation of soil infiltration characteristics under varying initial water content conditions [J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2023, 30(2):11-17.
- [24] WU S B, CHUI T F M, CHEN L. Modeling slope rainfall-infiltration-runoff process with shallow water table during complex rainfall patterns[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 599:e126458.
- [25] 黄煜, 张林, 付博阳. 坡地允许喷灌强度计算模型[J]. *节水灌溉*, 2021(2):80-86.
- HUANG Y, ZHANG L, FU B Y. Calculation model of allowable sprinkler irrigation intensity on sloping land[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(2):80-86.
- [26] 郭晓朦, 何丙辉, 姚云, 等. 扰动地表下不同长度坡面土壤物理性质及水分入渗特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(7):57-65.
- GUO X M, HE B H, YAO Y, et al. Soil physical properties and infiltration characteristics on slopes of different lengths under disturbed surface conditions [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(7):57-65.
- [27] VENKATA R K, ELDHO T I, RAO E P. A diffusion wave based integrated FEM-GIS model for runoff simulation of small watersheds [J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2009, 1(6):391-399.
- [28] SU N H. Random fractional partial differential equations and solutions for water movement in soils: Theory and applications[J]. *Hydrological Processes*, 2023, 37(3):e14844.
- [29] MU W B, YU F L, LI C Z, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and soil moisture content on different growing stages of spring maize [J]. *Water*, 2015, 7(6):2990-3008.
- [30] LEI W K, DONG H Y, CHEN P, et al. Study on runoff and infiltration for expansive soil slopes in simulated rainfall [J]. *Water*, 2020, 12(1):e222.
- [31] LI S H, LIU G G, ZHANG S X. A generalized regression neural network-based method for predicting cumulative infiltration volume in shallow slopes [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(9):7269-7285.
- [32] CHEN L, YOUNG M H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(7):eW07420.
- [33] 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.
- XIAO J, WANG B. Experimental study on influencing factors of infiltration characteristics of abandoned grasslands with different slopes in the loess hilly region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6):136-142.
- [34] 李毅, 邵明安. 雨强对黄土坡面土壤水分入渗及再分布的影响 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12):2271-2276.
- LI Y, SHAO M A. Effects of rainfall intensity on rainfall infiltration and redistribution in soil on loess slope land [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12):2271-2276.
- [35] 王新平, 李新荣, 康尔泗, 等. 腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入渗与再分配规律研究 [J]. *生态学报*, 2003, 23(6):1234-1241.
- WANG X P, LI X R, KANG E S, et al. Rainfall infiltration and redistribution in artificial vegetation areas on the southeastern edge of the Tengger Desert [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6):1234-1241.
- [36] 杜康. 安塞黄土丘陵区土壤水分动态与转化特征研究 [D]. 江苏 徐州: 江苏师范大学, 2021.
- DU K. Study on soil moisture dynamics and transformation characteristics in Ansai loess hilly Region [D]. Xuzhou, Jiangsu: Jiangsu Normal University, 2021.
- [37] 张晓茹, 刘志强, 焦钊棚, 等. 雨滴击溅下表土孔隙变化及其对入渗能力的影响 [J]. *土壤*, 2024, 56(3):601-609.
- ZHANG X R, LIU Z Q, JIAO F X, et al. Changes of topsoil pores under raindrop splash and their effects on infiltration capacity [J]. *Soils*, 2024, 56(3):601-609.
- [38] HOU J M, ZHANG Y W, TONG Y, et al. Experimental study for effects of terrain features and rainfall intensity on infiltration rate of modelled permeable pavement [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 243:177-186.
- [39] CHAPLOT V A M, LE BISSONNAIS Y. Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hillslope [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3):844-851.
- [40] STOMPH T J, DE RIDDER N, STEENHUIS T S, et al. Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics: Laboratory validation of a process-based model [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27(8):847-855.
- [41] XING W M, YANG P L, AO C, et al. Mathematical model of ammonium nitrogen transport to runoff with different slope gradients under simulated rainfall [J]. *Water*, 2019, 11(4):e675.