

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.018

张丽娜, 李萍, 胡向阳, 等. 不同坡度和植被覆盖黄土对降雨入渗的响应规律[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 113-121.

ZHANG Lina, LI Ping, HU Xiangyang, et al. Responses of loess ground with different slopes and vegetation covers to rainfall infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 113-121.

不同坡度和植被覆盖黄土对降雨入渗的响应规律

张丽娜^{1,2}, 李萍^{1,2}, 胡向阳³, 钟建平³, 杨恺⁴, 赵枝艳^{1,2}, 李同录^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 黄土高原水循环与地质环境教育部野外科学观测研究站, 甘肃 正宁 745399; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065; 4. 陕西省水土保持生态环境监测中心, 西安 710199)

摘要: [目的] 植被类型和坡度是影响黄土斜坡土体水分对降雨响应规律的控制因素。[方法] 分别选取裸土、蒿草和刺槐覆盖的平地, 裸土、蒿草、刺槐和刺槐蒿草混合覆盖的 15° 斜坡, 以及刺槐蒿草混合覆盖的 35° 斜坡, 共 8 个样地设置原位观测点, 测定剖面含水率及基本物理指标, 观测降雨后剖面的湿润锋深度, 分析植被类型和坡度对降雨入渗的影响。在室内设置 6 个坡度的模型试验, 研究坡度与垂直入渗深度和垂直于坡面入渗厚度的关系。[结果] 植被类型显著影响斜坡土体的湿润锋深度、含水率和饱和度, 刺槐蒿草混合地的湿润锋深度最浅, 湿润带饱和度可达 73.0%; 裸土地的湿润锋最深, 湿润带的饱和度最小, 最大饱和度仅为 52.4%。坡度对相同植被斜坡的湿润锋深度、含水率和饱和度的影响较小, 但短期内历经多次降雨后, 平地湿润带含水率和饱和度略高于斜坡。通过室内模型试验发现, 不同坡度黄土斜坡的垂直入渗深度不随坡度增加而变化, 垂直于坡面入渗厚度随坡度增加而减小。[结论] 研究结果可为黄土斜坡浅层滑移和水土流失治理提供理论依据。

关键词: 降雨; 黄土; 植被类型; 坡度; 湿润锋; 含水率

中图分类号: S157.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)06-0113-09

Responses of Loess Ground with Different Slopes and Vegetation Covers to Rainfall Infiltration

ZHANG Lina^{1,2}, LI Ping^{1,2}, HU Xiangyang³, ZHONG Jianping³,

YANG Kai⁴, ZHAO Zhiyan^{1,2}, LI Tonglu^{1,2}

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Observation and Research Station of Water Cycle and Geological Environment for the Chinese Loess Plateau, Ministry of Education, Zhengning, Gansu 745399, China; 3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 4. Shaanxi Province Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring Center, Xi'an 710199, China)

Abstract: [Objective] To investigate the soil moisture response to rainfall in loess ground with different slopes and vegetation types. [Methods] Eight in-situ observation plots were established, including flat surfaces with bare soil, *Artemisia* cover, and *Robinia pseudoacacia* cover, 15° slope with bare soil, *Artemisia* cover, *R. pseudoacacia* cover, and *R. pseudoacacia*-*Artemisia* complex cover, and 35° slope with *R. pseudoacacia*-*Artemisia* complex cover. Soil moisture content and basic physical parameters of the profiles were measured. The wetting front depth after rainfall was observed and the impact of vegetation type and slope gradient on rainfall infiltration was analyzed. Additionally, laboratory model tests with six different slope gradients were conducted to study the relationships between slope gradient, as well as vertical infiltration depth, and infiltration thickness normal to the slope surface. [Results] The results suggest that

收稿日期: 2024-06-26 修回日期: 2024-07-27 录用日期: 2024-08-08 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-11-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41877242, 42041006); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目 (300102260204); 陕西省水保中心资助项目 (2023SBJC-01)

第一作者: 张丽娜 (2000—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植被边坡渗流研究。E-mail: 17513360165@163.com

通信作者: 李萍 (1971—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土强度特性及黄土边坡可靠度研究。E-mail: dcdgx07@chd.edu.cn

vegetation types significantly affected the depth of the wetting front, soil moisture content, and saturation of slope soils. The *R. pseudoacacia-Artemisia* complex cover had the shallowest wetting front depth with a saturation of 73.0%. The bare soil exhibited the deepest wetting front and the lowest saturation, which was only 52.4%. The slope gradient had a minimal impact on the wetting front depth, soil moisture content and saturation for slopes with identical vegetation. However, after a number of short-term rainfall events, the moisture content and saturation in the wetting zone were slightly higher in flat ground than those in slopes. Laboratory model tests revealed that the vertical infiltration depth in slope was independent of slope gradient. In contrast, the infiltration thickness normal to the slope surface decreased with increasing slope gradient. [Conclusion] The study can provide a theoretical support for shallow landslide mitigation and soil erosion control for loess slopes.

Keywords: rainfall; loess; vegetation type; slope; wetting front; moisture content

Received: 2024-06-26

Revised: 2024-07-27

Accepted: 2024-08-08

Online(www.cnki.net): 2024-11-25

自黄土高原实施退耕还林(草)政策以来,生态环境显著改善^[1-2]。植被通过根系锚固效应增强斜坡浅层一定深度的稳定性,并且其冠层和枯落层可吸收并拦截部分水分,从而减少坡面侵蚀,减少水土流失。因此,植物在固坡方面的作用一直被认为是发挥着有利的作用^[3]。然而,近年来的现场调查却发现,在一些植被覆盖良好的斜坡地区,持续降雨也会引发大面积的浅层滑坡^[4-5]。这些滑坡是由降雨入渗导致的浅层土体含水率增加、土体有效强度降低所致。因此,研究植被斜坡浅层土体水分对降雨入渗的响应是预测降雨诱发浅层滑坡的关键。

坡体水分对降雨入渗的响应主要是指土中含水率大小和湿润锋深度的变化与降雨的关系。有植被覆盖的斜坡上降雨的入渗过程尤为复杂,受植被类型和坡度等其他诸多因素的影响。植物种类及其生长发育都显著改变土壤结构,使土壤结构更加疏松,从而影响浅层土体的渗透性和持水性^[6]。植被类型对降雨入渗影响的研究主要基于原位试验与现场监测,党毅等^[7]在雨后对草地、柠条灌木丛和杨树乔木林 3 种植被类型土壤水分监测发现,柠条灌木丛的湿润锋深度最大,含水率最先达到峰值;李松阳等^[8]选取裸地、草地、灌木丛和林地,观测不同植被土壤的降水入渗情况发现,灌木丛土壤的含水率最高;吴江琪等^[9]选取文冠果林地、沙棘林地、柠条灌丛和荒草地 4 种植被类型的土壤观测其渗透特征,也发现柠条灌木丛土壤的含水率最高,持水性最好;GLENDINNING 等^[3]将英国铁路和公路两侧的树木分成高需水植物和低需水植物发现,成熟的植被需水量高于幼年植被;XIAO 等^[10]指出植物可以通过生长作用增加土壤的持水能力。可见,植被显著改变土体的持水能力,并影响土中水分对降雨入渗的响应。坡度会改变入渗量,坡度增加使得实际承雨面积减小^[11-12],从而

影响到斜坡湿润锋深度和含水率分布。黄少平等^[2]通过大型边坡降雨模型试验,监测不同坡度植被边坡的水分变化发现,在相同降雨条件下,坡体内含水率与坡度呈负相关;付世琳等^[13]通过人工模拟降雨试验分析不同坡度和不同生育期的谷子对土壤入渗的影响发现,随着坡度增加,土壤内的含水率下降;而 ASSOULINE 等^[14]研究发现,坡体内含水率随着坡度的增大而增加;张涛等^[15]在室内通过不同坡度的人工降雨试验发现,坡度越大时,湿润锋深度越大;邵莲芬等^[16]研究也发现,边坡湿润锋深度与坡度呈正相关。可见,目前关于坡度对土壤水分的影响存在不同的观测结果。

为了深入研究黄土水分在不同植被类型和坡度下对降雨入渗的响应规律,本文以甘肃正宁的黄土塬区为研究对象,选择不同坡度的裸地、刺槐地、蒿草地、刺槐蒿草混合地,观测雨后的湿润锋深度,测定浅层坡体的含水率剖面,采用模型试验,研究不同坡度黄土水分对降雨入渗的响应,为黄土高原浅层滑坡和水土流失防治提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

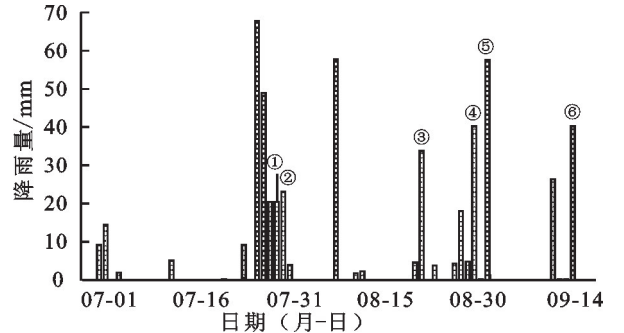
研究区位于甘肃省庆阳市正宁县蔡峪村(110°39'45"—10°47'45"E, 36°14'27"—36°18'23"N)。该区域处于黄土高原中部,子午岭西麓,属于陇东黄土高原地区的早胜塬,海拔 1 306 m,黄土层厚 90—150 m,地下水位埋深 97.0 m。属于大陆性季风半湿润气候,年平均降水量 620 mm,主要集中在 7—9 月,年蒸发量 500 mm。年最高气温 35.0 °C,最低气温 -22.8 °C,平均气温 8.3 °C,最大冻结深度 58 cm,无霜期 173 天。区内主要植物种类中,乔木有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、白杨(*Populus tomentosa*)、旱柳

(*Salix matsudana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等;灌木有柠条(*Caragana Korshinskii*)、狼牙刺(*Sophora moorcroftiana*)、山毛桃(*Amygdalus davidiana*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)等;草本植物有艾草(*Artemisia argyi*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)、柳叶箬(*Isachne globosa*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、柳叶剑蕨(*Loxogramme salicifolia*)、紫花地丁(*Viola philippica*)等。

1.2 野外观测

刺槐是黄土地区固土护坡的优势乔木树种,蒿类是黄土地区最常见的草本植物,因此以蒿草地、刺槐地和刺槐蒿草混合地 3 种植被覆盖区作为观测场地,共选取裸土、蒿草和刺槐覆盖的平地,裸土、蒿草、刺槐和刺槐蒿草混合覆盖的 15°斜坡,以及刺槐蒿草混合覆盖的 35°斜坡这 8 个原位观测点。分别在 2023 年的 7 月 29 日、7 月 30 日、8 月 21 日、8 月 28 日、8 月 30 日、9 月 13 日 6 次降雨事件中进行野外观测,在每次降雨结束后立即对 8 个观测点的湿润锋深度进行测量,野外观测湿润锋深度均为垂直深度,并测定地表以下 10 cm 处的质量含水率。现场附近有雨量观测站,测得这段时间的降雨量见图 1。自 7 月 1 日至 9 月 13 日共记录降雨 29 次,累积降雨量 527.9 mm,根据国家降雨强度划分标准^[17],共计小雨(0.1~10.0 mm)16 次,中雨(10.1~25.0 mm)5 次,大雨(25.1~

50.0 mm)5 次,暴雨(50.1~100.0 mm)3 次,7 月 26—31 日连续降雨量 184.65 mm,日降雨量最大达 67.8 mm/d,7 月 26 日之前长时间没有降雨,6 次观测相应的降雨量皆大于 20 mm。



注:①~⑥表示湿润锋观测时间。

图 1 观测期间降雨量

Fig.1 Rainfall during the observation period

观测采用剖面直接测量和洛阳铲钻孔测量。剖面测量针对有直立剖面露头,降雨后在直立剖面上可以直接观察到湿润锋界限,洛阳铲钻孔测量针对没有露头的黄土斜坡。

在裸土坡、蒿草地坡、刺槐地坡、刺槐蒿草混合地坡分别选取 50 cm×50 cm 样方,去除地表植被及腐殖土,各取 2 个直径 6.18 cm,高 2 cm 环刀样测定密度,2 个直径 6.18 cm,高 4 cm 环刀样测定饱和渗透系数。采用称重法测定天然密度,烘干法测定干密度,比重瓶法测定比重;采用变水头渗透试验测定饱和渗透系数^[18]。各观测点基本物理指标见表 1。

表 1 4 种植被类型覆盖土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of the cover soils for four vegetation types

植被类型	天然密度(ρ)/ ($g \cdot cm^{-3}$)	比重 (G_s)	干密度(ρ_d)/ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比 (e)	初始含水率 (w)/%	初始饱和度 (S_r)/%	饱和渗透系数(k_s)/ ($cm \cdot s^{-1}$)
裸土	1.70	2.71	1.34	1.02	9.5	25.3	1.11E-04
蒿草地	1.55	2.71	1.24	1.19	3.6	15.2	3.62E-04
刺槐地	1.54	2.71	1.24	1.19	2.9	19.4	2.21E-04
刺槐蒿草混合地	1.51	2.71	1.19	1.28	3.4	16.6	4.85E-04

1.3 模型试验设计

为了研究坡度对斜坡水分响应的影响,在长 50 cm,宽 10 cm,高 50 cm 的玻璃槽中进行模型试验。依据野外获得裸土的物理指标,用初始含水率为 9.5% 的黄土,过 2 mm 筛后分层装填玻璃槽,控制干密度为 1.34 g/cm³。在槽中水平填至 45 cm 高度处,再削出 15°,30°,45°,60°,75°斜坡,0°为对照组。喷壶中装水 1 200 mL,向斜坡顶部均匀连续洒水,试验前后记录喷壶中水量,同时每隔 3 min 记录垂直入渗深度(H)和垂直于坡面入渗厚度(D),在试验结束后分别测定垂直 5 cm 深处含水率。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 软件处理分析试验数

据,并且使用 Origin 2018、CorelDRAW 2020 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 植被类型和坡度与湿润锋深度的关系

由图 2 可知,从整体来看,坡度对湿润锋深度影响较轻微,且湿润锋深度与前期降雨历程有极大的关系。6 次调查 0°和 15°刺槐地的湿润锋深度较为一致,前 2 次调查二者的湿润锋深度为 43.9~48.9 cm,平地和斜坡差距在 0.9% 以内;第 3 次调查距离第 2 次调查已有 20 天间隔,研究区已有较长时间未降雨,所以平地和斜坡的湿润锋深度仅为 23.5,23.0 cm,差距在 2.1% 以内;第 4,5 次调查距离第 3 次调查时间

较短,二者湿润锋深度在 33.3~42.3 cm。第 6 次调查二者湿润锋深度为 27.7,27.1 cm,并且裸土、蒿草地、刺槐蒿草混合地的平地 and 斜坡也有同样的变化趋势,主要是因为降雨的投影面积相等,所以平地 and 斜坡的承雨面积相同,在降雨能够全部入渗的情况下,

平地 and 斜坡的湿润锋深度大致相同。但在经历多场降雨后,4 种场地出现平地湿润锋深度略微大于斜坡的情况,可能是因为产生径流后,斜坡上的径流在沿坡面分力作用下及时流走,而平面上的积水发生再次入渗所致。

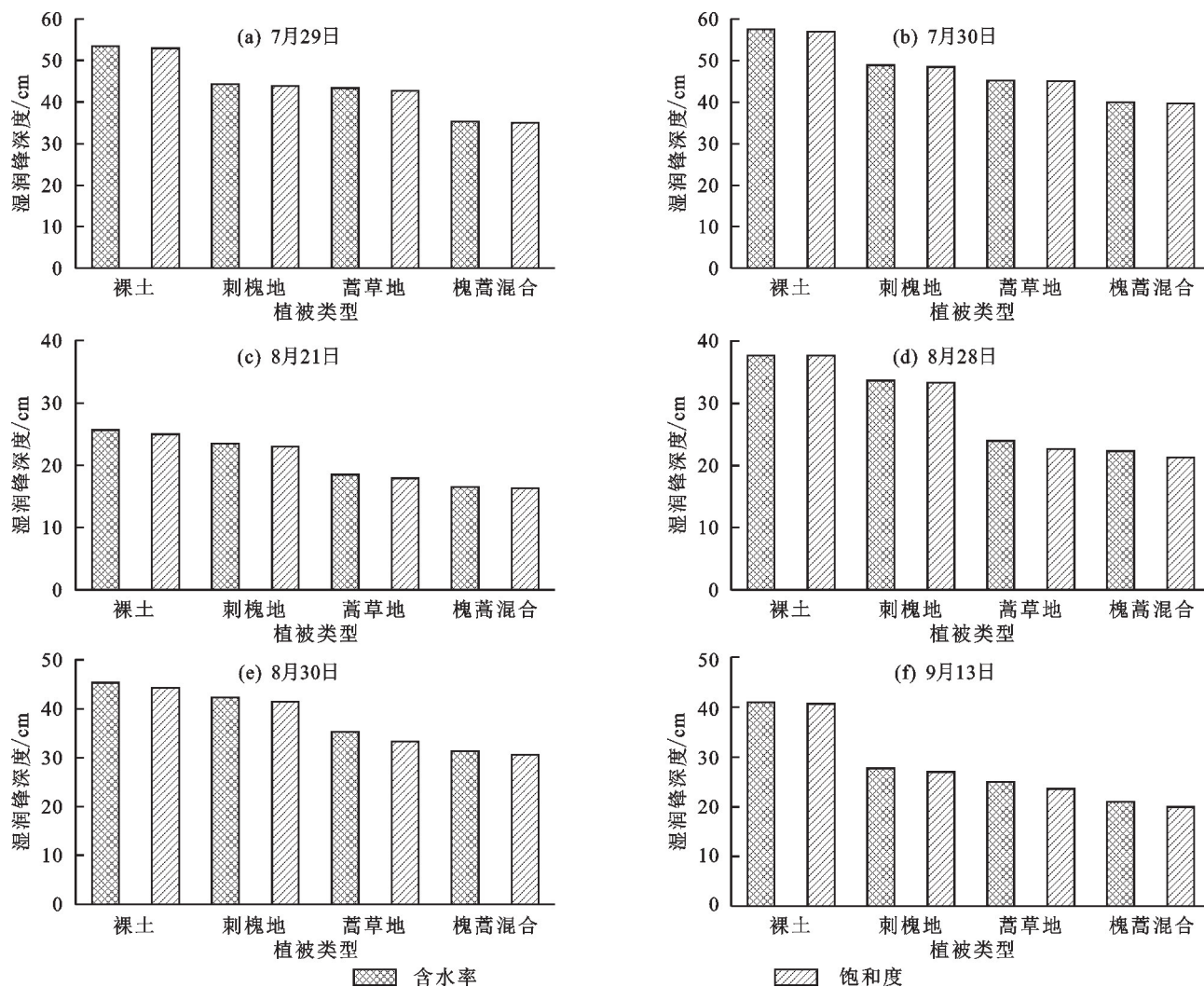


图 2 8 个样地雨后湿润锋深度

Fig.2 Depth of the wetting front after rainfall in eight sample plots

植被类型对观测场地的湿润锋深度影响较大。覆有刺槐和蒿草混合植被的斜坡湿润锋深度最小,最浅为 16.3 cm,最深达到 40.0 cm。覆有蒿草的斜坡湿润锋深度最浅为 17.9 cm,最深为 45.2 cm。覆有刺槐的斜坡湿润锋深度最浅为 23.0 cm,最深为 48.9 cm。裸土的湿润锋深度最深可达 57.6 cm,最浅为 25.0 cm,较其他植被类型更深。第 6 次调查 0°裸土、刺槐地、蒿草地、刺槐蒿草混合地的湿润锋深度分别为 41.0,27.7,25.0,21.0 cm,15°裸土、刺槐地、蒿草地的湿润锋深度分别为 40.7,27.0,23.6 cm,35°刺槐蒿草混合地的湿润锋深度为 20.0 cm,可以看出,在相同坡度条件下,随着植被类型不同,湿润锋深度出现明显的变化,裸土的湿润锋深度最深,其次是刺槐地、

蒿草地,刺槐蒿草混合地最浅,这种差异是因为植物能够将水分有效储存在根土复合层中。

2.2 湿润锋以上含水率及饱和度变化规律

降雨后不同坡度的裸土、蒿草地、刺槐地和刺槐蒿草混合地地表以下 10 cm 处含水率和饱和度变化规律见图 3。

4 种植物覆盖的斜坡在降雨后,10 cm 埋深含水率和饱和度有较大差异,刺槐蒿草混合地含水率最高为 27.4%,饱和度可达到 73.0%;蒿草地和刺槐地次之,含水率最高分别为 26.0%和 25.3%,饱和度分别达到 59.2%和 57.8%;而裸土含水率最高仅为 24.6%,饱和度仅到 52.4%。相同坡度下,如第 3 次调查时 0°裸土、刺槐地、蒿草地、刺槐蒿草混合地的含

水率分别为 22.0%, 23.1%, 24.2%, 25.9%, 饱和度分别为 46.9%, 52.8%, 55.1%, 69.0%; 15°裸土、刺槐地、蒿草地的含水率分别为 21.9%, 23.1%, 23.7%, 饱和度为 46.7%, 52.8%, 55.1%; 35°刺槐蒿草混合地的含水率和饱和度分别为 24.8%, 66.0%。说明乔木

与草地混合植被的持水性最好, 草地、乔木次之, 而裸土的持水性最差。

这是因为植物能够通过茎叶和枯落层及地下根系部分, 能够显著增强土壤的水分保持能力, 保持效果随着植物类型不同而变化。

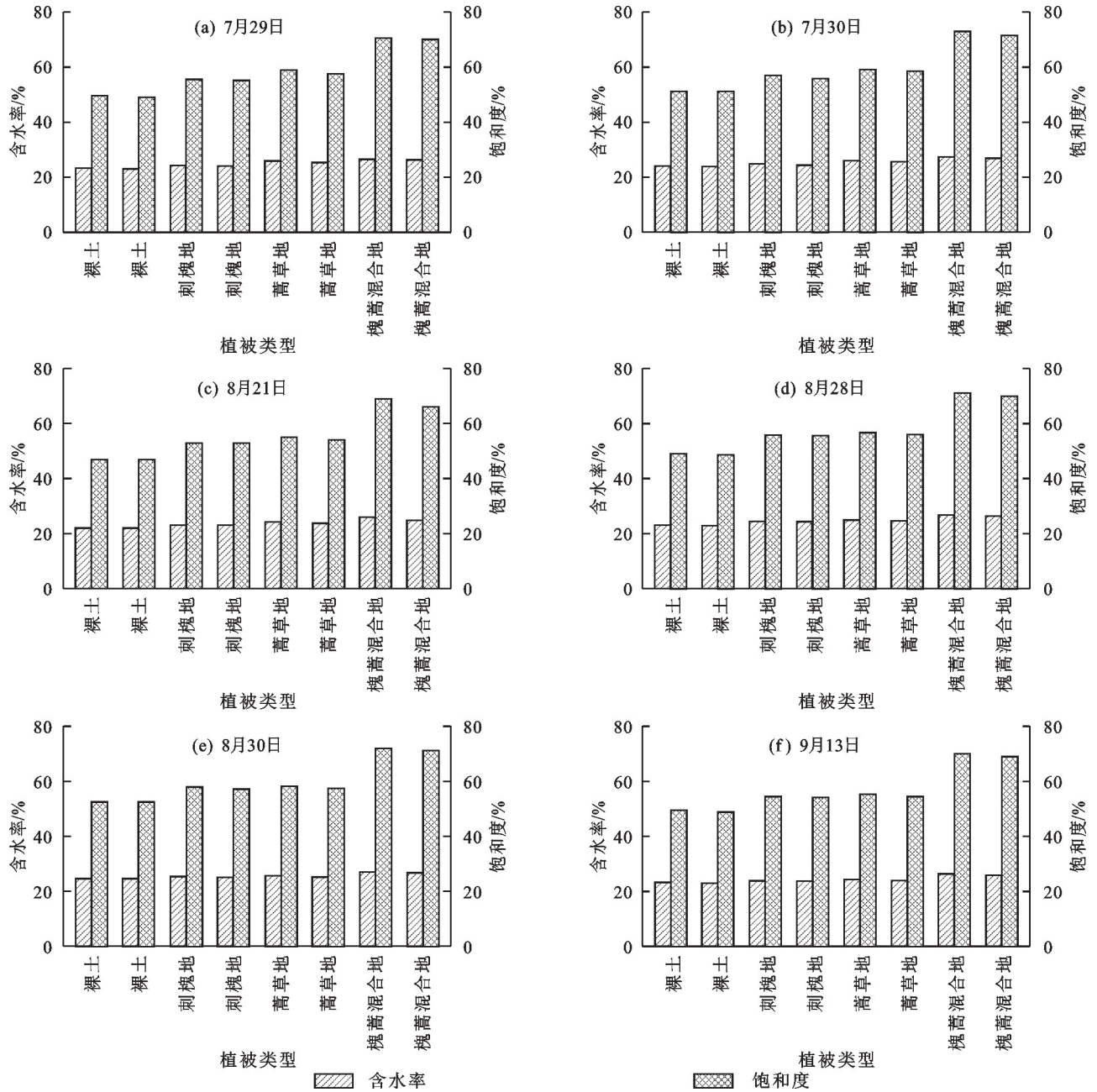


图 3 8 个样地雨后含水率和饱和度

Fig.3 Post-rainfall moisture content and saturation in eight sample plots

在进行的 6 次调查中, 刺槐蒿草混合地平地 and 斜坡含水率的饱和度差距均为 0.8%~4.2%, 蒿草平地 and 斜坡含水率和饱和度的差距为 1.2%~2.3%, 刺槐地平地 and 斜坡含水率和饱和度的差距为 0~2.0%, 裸土平地 and 斜坡含水率和饱和度的差距为 0~1.3%, 可以看出, 植物类型不同, 平地、斜坡的含水率和饱和度差异并不显著, 可能是降雨过程中, 降雨全部入渗到土壤中, 没有形成径流, 渗入平地 and 斜坡的水量大

致相同。

总体来看, 在长期降雨过程中, 各类植被覆盖和不同坡度的黄土湿润锋以内都为非饱和状态。由表 1 可知, 刺槐蒿草混合地的干密度最小, 仅 1.19 g/cm³, 而裸土地为 1.34 g/cm³, 但刺槐蒿草混合地饱和度高, 可见其浅表层持有更多的水分。

2.3 室内入渗模型试验结果

为进一步研究平地与斜坡在相同降雨条件下入

渗深度的关系,展开室内模型试验。共进行 6 组试验。由表 2 可知,6 个坡度的模型试验渗水量集中在 1 000 g 左右,模拟的降雨强度为 0.70~0.75 mm/min,换算成日降雨量为 1 008~1 080 mm/d,属于特大暴雨级别,降雨后湿润锋以上含水率为 30.2%~31.2%。

由图 4 可知,相同降雨条件下,不同坡度黄土斜坡的垂直入渗深度并未随着坡度的增加而变化,垂直于坡面入渗厚度随着坡度的增加而减小。在降雨条件较为一致的情况下,坡度对垂直入渗深度的影响较小。不同坡度的垂直入渗深度均表现为在 0~5 min 快速增大,在 5~30 min 内稳定增加,是因为入渗初期(0~5 min)水分在重力和基质吸力共同作用下形成高的水力梯度,使得湿润锋面快速下渗,随着水分逐渐充满土壤中的孔隙,在基质吸力逐渐减弱、水势下降的情况下,入渗速率逐渐减缓至稳定。随着坡度

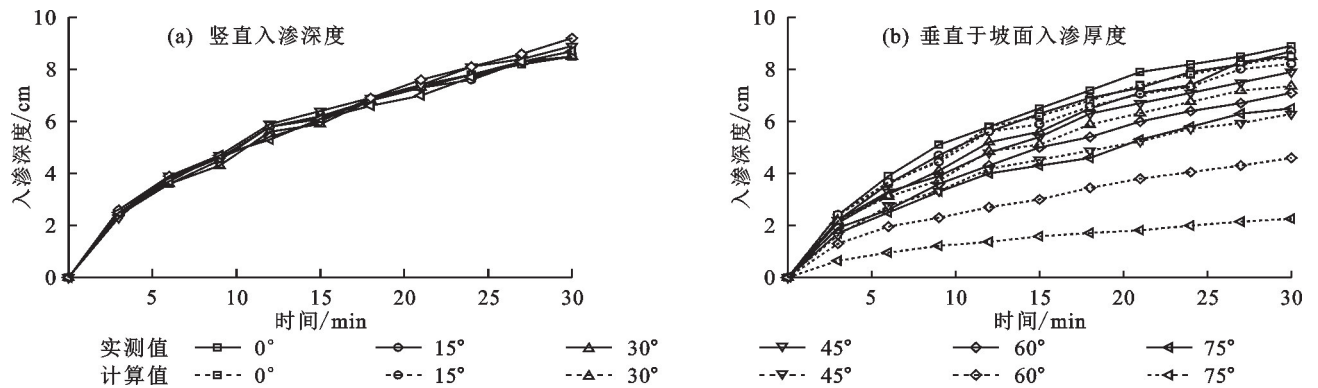


图 4 不同坡度室内入渗试验结果

Fig.4 Results of indoor infiltration tests for different slopes

3 讨论

3.1 不同植被类型土壤水分对降雨的响应

雨后观测发现,植被类型显著影响斜坡浅层土体的含水率和湿润锋深度。比起裸土地、蒿草地和刺槐地,蒿草刺槐混合地能够将水分保持在根土复合层,使得湿润锋深度更浅,浅层土体的含水率和饱和度比裸土高,本文测得刺槐蒿草混合地的持水性最好,蒿草地和刺槐地次之,裸地的持水性最差,朱显谟^[19]、陈志雄等^[20]、赵世伟等^[21]、ROSSI 等^[22]、GONZALEZ-MERCHAN 等^[23]也得到类似结论。这是因为植物根系的分布状况影响土体对水分的响应;李勇等^[24]调查发现,蒿草类根系主要分布在 0—20 cm 土层,对促进水分下渗起主要作用;郭钰等^[25]调查发现,刺槐起吸收作用的细根(0~2 mm)主要分布于 0—20 cm 土层,起输导作用的粗根(2~10 mm)主要分布于 40—60 cm 土层,比起裸土地、刺槐地和蒿草地,刺槐蒿草混合地的根系分布层次更广泛。刺槐蒿草混合地拥有丰富的含根量,增大根与土壤的接触面积,根系能够有效改善土壤孔隙结构,提高土壤孔隙

的增加,垂直于坡面入渗厚度逐渐减小,主要是因为入渗后期,随着坡度的增大,重力垂直于坡面的分力相对减小,从而减少垂直于坡面的水分入渗,垂直于坡面的水分入渗量则减少。

表 2 模型试验入渗量、降雨强度及降雨后含水量

Table 2 Intensity and moisture content after rainfall of modeling test

坡度/ (°)	入渗 水量/g	降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	质量 含水率/%	饱和度/ %
0	1 060.5	0.71	30.5	82.1
15	1 122.4	0.75	31.2	84.1
30	1 073.5	0.72	30.2	81.1
45	1 056.0	0.70	30.9	83.0
60	1 068.5	0.71	30.3	81.5
75	1 087.2	0.72	30.5	82.1

度,在相同饱和度下,持水量更多。同时根系分泌物也与土壤形成团聚体,增大土壤黏粒占比,从而吸持水分能力变强,有效增加土壤的持水性^[13,26],所以刺槐蒿草混合地更易持水。

3.2 不同坡度斜坡土壤水分对降雨的响应

MEIN 等^[27]将降雨渗透情况分为 2 个阶段:(1)当 $q < k_s$ 或 $k_s < q \leq f_p$ 时,降雨全部入渗,不会产生径流,土体内含水率逐渐增大;(2)当 $k_s < f_p \leq q$ 时,表层土体达到饱和状态,入渗率下降并产生径流。式中: q 为雨强 (mm/d); k_s 为土体饱和渗透系数 (cm/s); f_p 为土体渗透能力 (cm/s)。所以 $q = f_p$ 是产生径流的临界值,也是基质吸力提供的水力梯度变为 0 的阈值,本次观测期间日降雨量最大不超过 70 mm,降雨强度均小于 4 种植被类型斜坡土体的饱和渗透系数,并未达到产生径流的阈值 f_p ,降雨能够全部入渗,由重力和基质吸力共同提供水力梯度,观测发现平地 and 斜坡的湿润锋深度较为一致。不同坡度黄土斜坡同一降雨量下,水平接受降雨的面积相等,理论上可以证明斜坡上垂直入渗深度相等。

由图 5 可知,按水平和任意坡度 α 斜坡 2 种地形条件分析, L_0 和 L_a 分别为相同降雨面积下水平地面和斜坡面的长度(cm); S_0 和 S_a 为 2 种工况的垂直剖面上湿润区面积(cm^2); H_0 和 H_a 为 2 种工况的垂直入渗深度(cm); D_0 和 D_a 为 2 种工况的垂直于坡面入渗厚度(cm)。则有:

$$S_0 = L_0 \times H_0 \quad (1)$$

$$S_a = L_a \times D_a = L_0 \times H_a \quad (2)$$

没有地表产流的情况下,2 种情况降雨入渗量一样,湿润的面积相等,即:

$$H_0 = H_a \quad (3)$$

垂直于坡面的入渗厚度(D_a)为:

$$D_a = H_a \times \cos \alpha \quad (4)$$

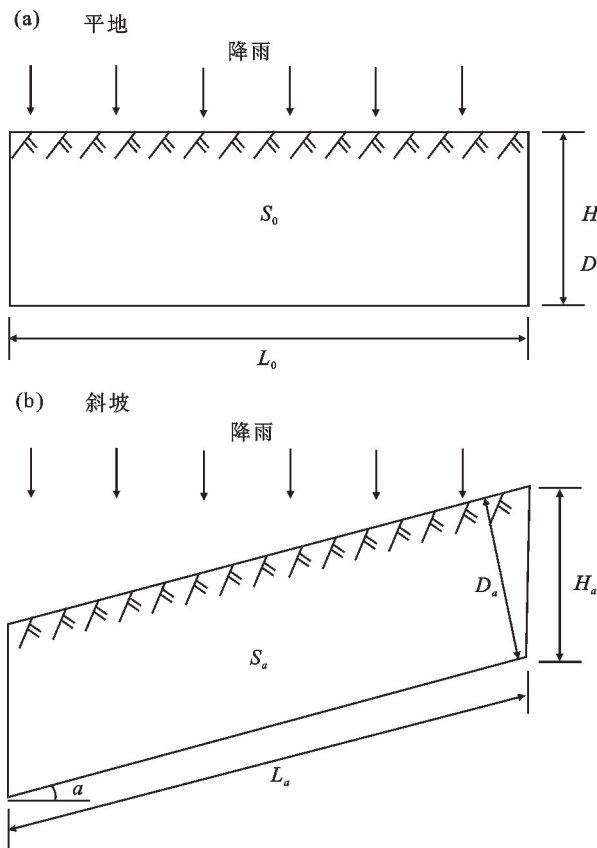


图 5 不同坡度入渗深度示意

Fig.5 Schematic diagram of the infiltration depths for different slopes

由公式(4)计算可知,垂直于坡面的入渗厚度与坡度呈负相关。水平地面的入渗厚度最大, 90° 坡垂直于坡面的入渗厚度为 0, 即野外可以看到直立坡上淋不到雨, 保持干燥状态, 与野外观测的数据一致。由于模型尺寸效应, 模型试验值略大于所示的理论计算值(图 4b)。

随着降雨量和降雨强度增大, 降雨历时延长, 不同坡度浅层土体对降雨水分的响应是否符合这一规

律需进一步分析。裸土的饱和和渗透系数最小, 将其与降雨强度的单位(mm/d)换算一致发现, 日降雨量 $< 95.9 \text{ mm}$ 时, 斜坡和平地上的降雨全部入渗。统计研究区 1 个完整水文年(2022-08-01—2023-07-31)的降雨数据, 总降雨量为 824.7 mm。共发生降雨 99 次, 其中小雨($0.1 \sim 10.0 \text{ mm}$) 75 次, 累积降雨量 209.1 mm, 占年累积降雨量 25.4%; 中雨($10.1 \sim 25.0 \text{ mm}$) 17 次, 累积降雨量 259.5 mm, 占 31.5%; 大雨($25.1 \sim 50.0 \text{ mm}$) 4 次, 累积降雨量 158.7 mm, 占 19.2%; 暴雨($50.1 \sim 100.0 \text{ mm}$) 3 次, 累积降雨量 197.4 mm, 占 23.9%。99 次降雨, 日降雨量均 $< 95.9 \text{ mm}$, 理论上所有降雨均能全部入渗, 可遇到大雨和暴雨均有径流痕迹。本次第 4, 5, 6 次调查均出现平地湿润锋垂直深度略微大于斜坡的情况, 是由于降雨持续时间较长后, 土体渗透能力逐渐下降, 浅层土体趋于饱和, 基质吸力提供的水力梯度趋近于 0, 仅由重力提供水力梯度, 降低渗透速度, 多余的水形成径流, 且降雨强度在一段时间内并不均匀。平地产生径流后, 水无法及时流走, 致入渗过程继续进行, 而斜坡随着坡度增加沿坡面分力增大, 水的径流速度加快, 入渗量比平地少, 因此, 平地的垂直入渗深度可能略大于斜坡。

在雨后, 刺槐蒿草混合覆盖斜坡土体饱和度可达到 73.0% 以上, 根据王常明等^[28] 的研究, 当土体饱和度超过 65%, 黄土的应力—应变关系便趋近于饱和状态, 黏聚力几乎降至 0。由于浅层土体自重较小, 其内摩擦角对边坡稳定性的贡献有限^[29], 因此在一定条件下, 刺槐蒿草混合植被边坡稳定性对黏聚力极为敏感, 相较裸土地更易发生浅层滑坡。然而, 树木根系具有显著的锚固作用, 可以增强土体的稳定性, 但如果降雨间隔短且降雨持续时间长, 湿润锋加深, 树根的锚固作用减弱, 从而大大增加大面积浅层滑坡的风险^[30]。

4 结论

(1) 植被类型对雨后土壤的湿润锋深度、含水率和饱和度影响较为显著, 植被土壤能够有效地将水分保持在根土复合层内, 尤其是刺槐蒿草这类混合植被, 持水效果最好, 其饱和度最高可达 73%, 其次是蒿草地和刺槐地, 饱和度最高可达 59.2% 和 57.8%, 而裸土持水性最差, 饱和度最高仅 52.4%。

(2) 植被类型相同时, 雨后土壤湿润锋深度、含水率和饱和度受坡度的影响较小, 但短期内历经多次降雨后, 平地的湿润锋深度和含水率略高于斜坡。

(3) 根据室内模型试验, 在相同降雨条件下, 黄土

斜坡的竖直入渗深度不随坡度的增加而变化,垂直于坡面入渗厚度随着坡度的增大而减小。

参考文献:

- [1] 李航,严方晨,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J].生态学报,2018,38(11):3889-3898.
LI H, YAN F C, JIAO J Y, et al. Soil water availability and holding capacity of different vegetation types in hilly-gullied region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11): 3889-3898.
- [2] 黄少平,陈俊毅,肖衡林,等.不同坡度植被边坡降雨入渗和径流侵蚀规律的试验研究[J].岩土力学,2023,44(12):3435-3447.
HUANG S P, CHEN J Y, XIAO H L, et al. Test on rules of rainfall infiltration and runoff erosion on vegetated slopes with different gradients[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3435-3447.
- [3] GLENDINNING S, LOVERIDGE F, STARR-KEDDLE R E, et al. Role of vegetation in sustainability of infrastructure slopes[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability, 2009, 162(2): 101-110.
- [4] 韩勇,郑粉莉,徐锡蒙,等.子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系:以富县“7·21”特大暴雨为例[J].生态学报,2016,36(15):4635-4643.
HAN Y, ZHENG F L, XU X M, et al. Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziwuling forest area: A case study of the “7·21” disaster in Fuxian County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4635-4643.
- [5] 刘银鹏,李同录,胡向阳,等.陇东陕甘边界降雨水毁灾情调查与启示[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):77-83.
LIU Y P, LI T L, HU X Y, et al. Investigation of water induced damages triggered by rainfall in east Gansu and the implications[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 77-83.
- [6] 朱显谟,田积莹.强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J].水土保持学报,1993,7(3):1-10.
ZHU X M, TIAN J Y. The study on strengthening anti-scourability and penetrability of soil in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 7(3): 1-10.
- [7] 党毅,王维,张永娥,等.坝上高原不同植被类型覆盖下土壤水分含量对降雨的动态响应[J].北京林业大学学报,2023,45(5):106-118.
DANG Y, WANG W, ZHANG Y E, et al. Dynamic response of soil moisture content to rainfall under different ve-
- getation cover types on the Bashang Plateau, northwestern Hebei Province of Northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(5): 106-118.
- [8] 李松阳,刘康妮,余杭,等.云南省蒋家沟不同植被类型土壤物理性质对水分入渗特征的影响[J].山地学报,2021,39(6):867-878.
LI S Y, LIU K N, YU H, et al. The influence of soil physical properties on the infiltration of soil covered by different vegetation types in the Jiangjia gully, Yunnan Province, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(6): 867-878.
- [9] 吴江琪,马维伟,李广,等.黄土高原4种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):133-138.
WU J Q, MA W W, LI G, et al. Effects of four vegetation types on soil physical characteristics and permeability in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 133-138.
- [10] XIAO T, LI P, FEI W B, et al. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review[J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: e167524.
- [11] CHEN L, YOUNG M H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces[J]. Water Resources Research, 2006, 42(7): eW07420.
- [12] WANG J, CHEN L, YU Z B. Modeling rainfall infiltration on hillslopes using Flux-concentration relation and time compression approximation[J]. Journal of Hydrology, 2018, 557: 243-253.
- [13] 付世琳,姚冲,余倩,等.不同坡度和不同生育期的谷子坡耕地入渗特征[J].水土保持学报,2023,37(4):23-30.
FU S L, YAO C, YU Q, et al. Infiltration characteristics of millet slope farmland with different slope gradient and different growth period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 23-30.
- [14] ASSOULINE S, BEN-HUR M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing[J]. Catena, 2006, 66(3): 211-220.
- [15] 张涛,张建新,范文波,等.不同坡面条件下土壤水分运移规律和保蓄能力研究[J].节水灌溉,2023(8):44-51.
ZHANG T, ZHANG J X, FAN W B, et al. Study on soil water transport and storage capacity under different slope conditions[J]. Water Saving Irrigation, 2023(8): 44-51.
- [16] 邵莲芬,曾红彪,李雄峰,等.矿山边坡坡度对降雨入渗与侵蚀过程影响试验[J].人民黄河,2016,38(4):74-78.
SHAO L F, ZENG H B, LI X F, et al. Experimental study on rainfall infiltration and runoff erosion process with the gradient of mining slope[J]. Yellow River,

- 2016, 38(4): 74-78.
- [17] 科迪. 降雨强度标准划分[J]. 北京水利, 1995(4): 49.
KE D. Standard division of rainfall intensity[J]. Beijing Water, 1995(4): 49.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [19] 朱显谟. 再论黄土高原国土整治“28 字方略”[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1995, 9(1): 44-48.
ZHU X M. Re-discussion on the “28-Character General Plan” of land consolidation in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(1): 44-48.
- [20] 陈志雄, 汪仁真. 中国几种主要土壤的持水性[J]. 土壤学报, 1979, 16(3): 277-281.
CHEN Z X, WANG R Z. The moisture retention of several important soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1979, 16(3): 277-281.
- [21] 赵世伟, 周印东, 吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 119-122.
ZHAO S W, ZHOU Y D, WU J S. Soil moisture characteristics of different vegetations in northern of Zi-wuling[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(4): 119-122.
- [22] 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.
- [23] GONZALEZ-MERCHAN C, BARRAUD S, BEDELL J P. Influence of spontaneous vegetation in stormwater infiltration system clogging[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2014, 21(8): 5419-5426.
- [24] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 草类根系对土壤抗冲性的强化效应[J]. 土壤学报, 1992, 29(3): 302-309.
LI Y, XU X Q, ZHU X M, et al. Intensifying effect of herb roots on soil anti scourability[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(3): 302-309.
- [25] 郭钰, 姚佳峰, 董媛, 等. 油松和刺槐纯林及混交林根系分布特征[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11): 2881-2888.
GUO Y, YAO J F, DONG Y, et al. Root distribution characteristics of monoculture and mixture of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(11): 2881-2888.
- [26] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 等. 植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J]. 中国水土保持, 2017(3): 27-30.
LI K, YAO W Y, XIAO P Q, et al. Research progress on the influence of vegetation on soil infiltration and surface runoff process [J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(3): 27-30.
- [27] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain [J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384-394.
- [28] 王常明, 张淑华, 王钢城, 等. 含水量对结构性土力学性状的影响[C]// 第三届全国岩土与工程学术大会. 第三届全国岩土与工程学术大会论文集. 成都: 吉林大学建设工程学院, 2009: 73-77.
WANG C M, ZHANG S H, WANG G C, et al. Effect of water content on the mechanical properties of structural soils [C]// The Third National Geotechnical and Engineering Conference. Proceedings of the Third National Geotechnical and Engineering Conference. Chengdu: College of Construction Engineering, Jilin University, 2009: 73-77.
- [29] 张常亮, 李萍, 陶福平, 等. 黄土强度指标对边坡稳定性的影响研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(3): 20-24.
ZHANG C L, LI P, TAO F P, et al. Research of effect of strength index on loess slope stability [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(3): 20-24.
- [30] 李同录, 李颖喆, 赵丹旗, 等. 对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 25-32.
LI T L, LI Y Z, ZHAO D Q, et al. Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 25-32.