

西宁盆地黄土区坡形及植被类型对坡面土壤入渗影响

杨馥铖¹, 李姜瑶^{2,3,4}, 余冬梅^{2,3}, 刘昌义¹, 缪晓星⁵,
王延秀⁵, 胡夏嵩¹, 卢海静⁶, 付江涛⁷, 闫聪¹, 何伟鹏¹

(1.青海大学地质工程系, 西宁 810016; 2.中国科学院青海盐湖研究所盐湖资源综合高效利用重点实验室, 西宁 810008; 3.青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008; 4.中国科学院大学, 北京 100049; 5.青海省水土保持中心, 西宁 810000; 6.青海大学农牧学院, 西宁 810016; 7.青海大学农林科学院, 西宁 810016)

摘要:为进一步探讨青藏高原东北部黄土区草本植物护坡机理,选取西宁盆地长岭沟流域自建试验区,通过设计2种不同坡形和选取适宜当地气候条件生长的3种草本植物,采用野外试验区人工模拟降雨方法,首先分析了坡面土壤水文参数(土壤入渗、坡面土体含水量)分布变化,进而探讨了影响种植草本坡面土壤水分入渗的主要因素与特征,最后对坡面土壤水分入渗过程进行模型模拟与评价。结果表明:种植垂穗披碱草阶梯形边坡产流时间相对最晚,直形裸坡阶段产流量最大,其最大阶段累积径流量在降雨试验40~45 min时,为17 730 mL;2种坡形边坡坡面平均稳定入渗速率由大到小依次为阶梯形种植垂穗披碱草边坡(0.519 mm/min)、直形垂穗披碱草边坡(0.423 mm/min)、直形老芒麦边坡(0.422 mm/min)、直形细茎冰草边坡(0.318 mm/min)、阶梯形裸坡(0.321 mm/min)和直形裸坡(0.192 mm/min),且种植垂穗披碱草和老芒麦边坡土体含水量在地表以下0—50 cm增幅相对最高,说明种植草本有助于边坡土体内部水分入渗。在此基础上,采用Horton模型、Kostiakov模型和通用经验模型进行坡面土壤水分入渗模拟,结果表明直形边坡土壤水分入渗过程以Horton模型和通用经验模型的拟合效果相对较为理想;阶梯形边坡则以Horton模型得到的土壤水分入渗拟合效果相对最优;最后,通过Pearson相关性分析得出,区内边坡土壤水分入渗特性主要影响因素为土壤有机质与植被覆盖度,且土壤有机质与初始入渗率间呈显著正相关关系(R^2 为0.986),植被覆盖度与稳定入渗率间则呈极显著相关关系(R^2 为0.997)。研究结果对于科学有效防治高寒半干旱区水土流失以及研究不同植被类型及坡形水土保持能力具有理论研究价值和实际指导意义。

关键词:寒旱环境; 西宁盆地; 黄土区; 植被护坡; 土壤入渗; 入渗模型

中图分类号:S157.2 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)06-0030-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.005

Effects of Slope Shape and Vegetation Type on Soil Infiltration on Slope in the Loess Area of Xining Basin

YANG Fucheng¹, LI Jiangyao^{2,3,4}, YU Dongmei^{2,3}, LIU Changyi¹, MIU Xiaoxing⁵,
WANG Yanxiu⁵, HU Xiasong¹, LU Haijing⁶, FU Jiangtao⁷, YAN Cong¹, HE Weipeng¹

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016;

2. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008; 3. Qinghai Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining 810008; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

5. Qinghai Soil and Water Conservation Research Center, Xining 810000; 6. School of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016; 7. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016)

Abstract: To further explore the mechanism of slope protection by herbaceous plants in the loess region of northeastern Qinghai-Tibet Plateau, the Changlinggou catchment in Xining Basin was selected as the testing area. By designing two different slope shapes and selecting three herbaceous plants suitable for the local climatic conditions, and using the method of artificial rainfall simulation based on the field experimental area,

收稿日期:2022-03-30

资助项目:青海省自然科学基金项目(2020-ZJ-906);国家自然科学基金项目(42041006,41572306);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905);青海大学地质资源与地质工程重点学科建设项目(41250103)

第一作者:杨馥铖(1998—),男,在读硕士研究生,主要从事地质灾害及防治研究。E-mail:649626453@qq.com

通信作者:余冬梅(1986—),女,助理研究员,主要从事环境地质及其地质灾害防治领域研究。E-mail:ydm2011@isl.ac.cn

the distribution and transformation of slope soil hydrological parameters (soil infiltration, soil moisture content) were analyzed first, then characteristics of soil water infiltration and its main influence factors on the slope of planting herbs were discussed. Finally, the process of soil water infiltration on the slope was simulated and evaluated. The results showed that the runoff generation time of the terraced slope planted with *Elymus nutans* in the area was the latest, and the maximum runoff occurred in straight bare slope, and the maximum stage cumulative runoff was 17 730 mL when the artificial rainfall time was 40~45 min. The average stable infiltration rate of the six different types of slope in the region from large to small was terraced slope planted with *E. nutans* (0.519 mm/min), straight slope planted with *E. nutans* (0.423 mm/min), straight slope planted with *Elymus sibiricus* (0.422 mm/min), straight slope planted with *Agropyron trachycaulum* (0.318) mm /min), terraced bare slope (0.321 mm/min), straight bare slope (0.192 mm/min). The increase of soil moisture content at 0—50 cm below the surface of the slope planted with *E. nutans* and *E. sibiricus* were relatively the highest, indicating that planting herbs was conducive to the internal water infiltration of slope soil. On this basis, Horton model, Kostikov model and general empirical model were used to simulate moisture infiltration on slope. The results showed that Horton model and general empirical model were more suitable for fitting soil moisture infiltration on straight slope. While Horton model was more suitable for fitting soil moisture infiltration process on terraced slope. Pearson correlation analysis showed that soil organic matter and vegetation coverage were the main factors influencing slope infiltration characteristics in the testing area. And initial infiltration rate was significantly and positively correlated with soil organic matter content (R^2 was 0.986). And an extremely significant correlation between vegetation coverage and stable infiltration rate was identified (R^2 was 0.997). The results of this study had theoretical research value and practical guiding significance for the scientific and effective prevention and control of soil and water loss in alpine and semi-arid areas, and for the study of vegetation types and slope shape soil and water conservation capacity.

Keywords: cold and arid environment; Xining Basin; loess area; slope protection by vegetation; soil infiltration; infiltration model

青海位于我国西北内陆,是黄河、澜沧江和长江发源地,也是主要水源区域,据文献统计^[1],青海境内地下水总量为 269.3 亿 m^3 ,地表水径流总量为 626.3 亿 m^3 ,是我国重要的生态屏障和水源地。近 30 年以来,由于区内人口密度递增和基础工程力度加大,加之受高寒干旱一半干旱气候因素等影响,青海境内水土流失现象较为严重。已有研究^[2]表明,西宁地区水土流失面积约为 5 826 km^2 ,占西宁市土地总面积的 76.6%。严重的水土流失及其次生灾害给当地生态环境带来极大的危害,严重制约当地经济社会的快速发展。

植被护坡可有效提高地表覆盖度,起到降低水土流失和提高边坡浅层稳定性的作用,近年来受到国内外相关学者的普遍关注与研究^[3-4]。植被护坡降低水土流失程度、提高边坡浅层稳定性的机理,在于植物地上茎叶部分的水文效应和植物根系部分的力学效应^[5]。其中,水文效应在于植物可发挥其地上部分对降雨的截留与遮蔽以降低雨滴对地表土壤颗粒的溅蚀,以及地上部分和凋落物对地表的覆盖以增

加地表粗糙度,从而降低地表径流对地表的侵蚀和冲刷。基于上述理论,相关学者开展了大量研究,取得诸多卓有成效的研究成果,这些研究成果较好地指导当地生态恢复实践,如龙诚璧等^[6]研究发现,种植不同类型的草本植物均可降低边坡的入渗率,提高边坡的稳定性;Wang 等^[7]则研究发现,当植被覆盖度过低或过高时,水土流失和地表径流不会随着覆盖度的进一步增加而发生显著变化;也有学者^[8-11]研究不同坡形对地表径流水文参数以及地表径流对不同坡形坡面土壤侵蚀的影响指出,坡面形态可影响坡面土壤侵蚀及水运动。

土壤入渗模型是预测土壤水分入渗过程的重要方法,影响地表产流量、水分在土壤中的分布状况。国内外也有诸多学者^[12-14]将其应用于土壤入渗研究中,表现在崔艳红等^[15]使用 Horton 模型、Kostikov 模型、Philip 模型和通用经验模型,研究晋西黄土残塬沟壑区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林在不同林龄(15 年、25 年及 35 年)和密度(800,1 200,1 600,1 800,2 200 株/ hm^2)条件下土壤入渗特征,结果表明,通用经验模型

的平均回归系数(R^2)为 0.977, Horton 模型的平均回归系数(R^2)为 0.958, Kostiakov 模型的回归系数(R^2)为 0.953, Philip 模型的回归系数(R^2)为 0.945, 并得到采用通用经验模型拟合效果相对更显著。Fariba 等^[16]采用 Philip 模型、Horton 模型、Kostiakov 模型、Modified Kostiakov 模型, 以及 Revised modified Kostiakov 模型拟合了伊朗中部塞姆南地区农田水分入渗过程, 结果表明, Revised modified Kostiakov 模型为研究伊朗干旱地区农田渗透的最优模型, 其平均回归系数(R^2)为 0.994。

进一步分析表明, 受植物生长类型、植物生长区地形、区域气候和植物生长期的影响, 上述研究存在一定的地域性和局限性, 尚不能完全或较好地应用于地处青藏高原东北部和黄土高原西缘交接地带的西宁盆地, 从而使该区域开展植被护坡工程实践得到理论支撑。基于此, 本研究选取地处高寒半干旱环境的西宁盆地为研究区, 采用自建试验区的方式, 通过原位人工模拟降雨试验, 开展直形边坡、阶梯形边坡和种植不同植物类型条件下, 坡面径流参数、土壤水渗透及其入渗模型适用性方面的研究。该研究为进一步开展高寒半干旱气候条件下, 采用植被生态防护有效防治水土流失、浅层滑坡等灾害提供理论支撑和实际应用指导。

1 研究区概况

研究区位于西宁盆地毛鸡湾流域长岭绿化区自建试验区($36^{\circ}36'58''N, 101^{\circ}44'49''E$), 海拔 2 400 m。区内属于高原内陆半干旱气候, 年平均降水量 478 mm, 年蒸发量 1 363.6 mm, 年日照时间 2 600~2 683 h, 年平均气温 $4.8\sim 7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[17]。区内植物以乔木、灌木、草本为主, 其中草本 711 种, 乔木 119 种, 藤本较少为 12 种^[18], 植被类型主要以针茅、蒿类为主, 主要草本植物为冰草(*Agropyron cristatum*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、马先蒿(*Pedicularis sylvatica*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、赖草(*Leymus secalinus*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)等, 灌木植物为亚菊(*Ajanian pallasiana*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、北方枸杞(*Lycium chinense*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等^[19]。

2 材料与方法

2.1 试验材料

图 1 为试验区 3 种草本试验种植方案示意图, 在自建试验区设计 2 种不同坡形边坡, 即直形边坡与阶梯形边坡, 2 种边坡坡长为 8 m, 坡宽为 1.25 m, 坡度为 25° , 且阶梯形边坡采用每隔一定高度设 1 个平台。

筛选 3 种优势草本植物垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、老芒麦(*Elymus sibiricus*)和细茎冰草(*Agropyrontrachycaulum*)作为供试种, 它们都具有较强的耐寒、耐旱性和生长适应性强等特点。于 2018 年开展区内植物种植试验, 试验时植物生长期为 3 年。其中, 在直形边坡分别种植垂穗披碱草、老芒麦和细茎冰草, 并设立 1 块未种植裸坡作为试验对照组; 相应地, 在阶梯形边坡种植垂穗披碱草, 并设立 1 块未种植裸坡作为对照组。

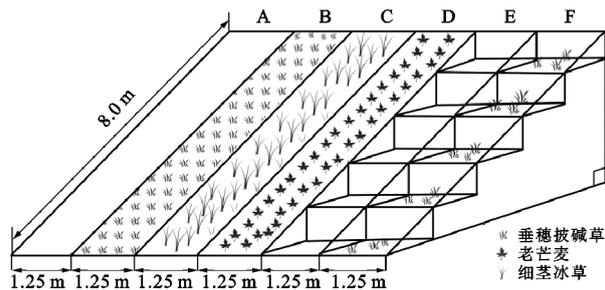


图 1 试验区 2 种坡形边坡类型及其 3 种草本植物试验种植方案示意

2.2 试验方法

2.2.1 模拟降雨方法 试验于 2020 年 8 月在西宁盆地长岭沟流域自建试验区进行, 研究采用的模拟降雨试验装置见图 2。该装置含 9 个降雨喷头, 每个喷头间距为 2 m, 模拟降雨试验过程中利用水泵将水源运输至试验区, 并采用水阀和水压表来调节水压以达到试验所需降雨强度。模拟降雨试验设计降雨历时为 60 min, 试验中在每块边坡坡脚处放置 1 个集流槽, 每隔 5 min 收集 1 次径流量。在模拟降雨试验开始前, 需通过模拟降雨预试验来确定坡面降雨均匀性和实际降雨强度, 由结果可知, 实际降雨强度为 34.33 mm/h , 达到野外模拟降雨试验要求。

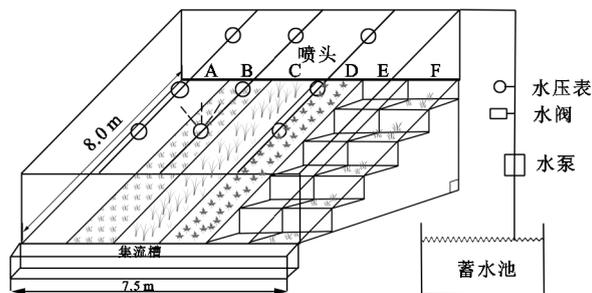


图 2 试验区边坡原位模拟降雨试验装置组成与结构示意

2.2.2 含水量测定方法 为获得区内模拟降雨试验过程中边坡土体含水量分布特征, 分别采用 WT-11 型土壤水分传感器和 TRIME-PICO-IPH-T3C TDR 剖面土壤水分传感器监测土体含水量入渗特征。在模拟降雨试验开始前, 将传感器放置于 2 种坡形边坡顶部和底部位置其坡面地表以下 15, 30, 50 cm 深度处, 并在降雨试验前后及试验过程中记录水分传感器测量值, 以此来监测边坡地表以下 3 个不同

深度处的土体含水量变化特征。

2.2.3 坡面水分入渗计算方法 已有研究^[20]表明,土壤入渗是水循环和径流形成过程的重要环节,入渗率可反映土壤抗侵蚀能力和水源涵养作用。若忽略植被截流和降雨蒸发作用,各时段的降雨入渗计算公式为^[21]:

$$f = R \cos \alpha - 10V / [(t_{i+1} - t_i)S] \quad (1)$$

式中: f 为降雨入渗率(mm/min); R 为降雨强度(mm/min); α 为坡面坡度($^\circ$); t_{i+1} 、 t_i 为各时段开展降雨模拟试验始末时间(min); V 为各时段对应的产流量(mL); S 为坡面面积(cm^2)。

2.2.4 土壤水分入渗模型方法 土壤水分入渗模型指在降雨模拟试验基础上所建立的土壤水分随时间变化的理想状态模型^[22]。本研究采用 Kostiakov 模型、通用经验模型和 Horton 模型对坡面土壤入渗过程进行模拟评价。

Kostiakov 模型计算公式为^[23]:

$$f(t) = at^{-b} \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 、 b 为参数。

Horton 模型计算公式为^[24]:

$$f(t) = i_c + (i_0 + i_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); i_c 为稳定入渗率(mm/min); i_0 为初始入渗率(mm/min); k 为参数。

通用经验模型计算公式为^[25]:

$$f(t) = a + bt^{-n} \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 、 b 、 n 为由实测数据确定的拟合经验参数。

2.2.5 影响土壤入渗的主要因素分析方法 土壤入渗过程受多种因素的综合影响,本研究选取土壤密度、初始含水量、有机质含量、植被覆盖度4种因素,通过 SPSS 19.0 软件采用 Pearson 相关性分析法进行。此外,土壤初始含水量采用烘干法,土壤有机质测定采用高温外加热—重铬酸钾氧化容量法,土壤密度采用环刀法,植被覆盖度采用便携式植被覆盖度摄影测量仪(PVCPI-2)进行测量。

3 结果与分析

3.1 2种坡形条件下坡面累积径流量特征

据已有研究结果^[26]可知,产流时间愈短,坡面水分入渗愈少,相对易于产生坡面径流现象。由本研究模拟降雨试验结果可知,区内直形边坡产流时间由裸坡至种植老芒麦边坡分别为降雨试验开始后2,4,3,4 min,得到未种植裸坡产流时间相对最短,种植垂穗披碱草和老芒麦边坡产流时间最长,其次为种植细

茎冰草边坡,该结果说明,在相同坡形条件下种植草本植物边坡能有效延长产流时间,增加土壤水分入渗。进一步研究得到,区内内阶梯形边坡产流时间分别为3,8 min,与直形裸坡及直形垂穗披碱草坡相比较,阶梯形边坡产流时间均有延长,且在种植垂穗披碱草阶梯形边坡与直形边坡相比产流时间延长100%,说明阶梯形边坡增加土壤水分入渗效果相对更为显著。从图3可以看出,除种植垂穗披碱草阶梯形边坡外,其余5种不同类型边坡在降雨5 min时已经产流,且相比较其他边坡,直形裸坡阶段累积径流量最大,其最大累积径流量在降雨试验40~45 min时为17 730 mL;在直形边坡中种植老芒麦和种植垂穗披碱草边坡阶段产流量整体相对较低,种植细茎冰草边坡整体产流量较高,但显著低于未种植裸坡;在阶梯形边坡中,种植垂穗披碱草边坡阶段产流量整体较为稳定,产流量范围为210~740 mL。通过与直形垂穗披碱草边坡相比较可知,种植垂穗披碱草阶梯形边坡阶段产流量显著降低。由此可知,区内种植草本可有效减少坡面径流量,且阶梯形边坡相对更能有效减少坡面径流量。

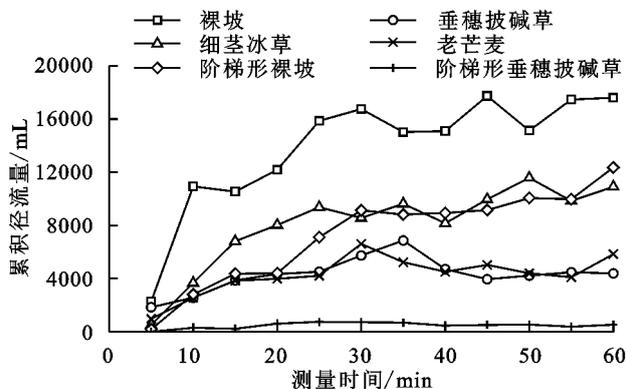


图3 2种不同坡形边坡坡面累积径流量与模拟降雨时间关系

3.2 不同草本植物与不同坡形条件下坡面土壤入渗特征

3.2.1 未种植裸坡坡面入渗率及其特征 从表1可以看出,区内2种不同坡形裸坡坡面降雨入渗速率表现为在降雨开始0~30 min时均呈降低趋势,在30~60 min时趋于稳定,且平均入渗速率分别为0.192,0.321 mm/min,这说明区内未种植裸坡其入渗速率随降雨历时增加均表现出先降低后趋于稳定变化的规律。

3.2.2 4种不同类型直形边坡坡面土壤入渗率及其特征 由表1可知,区内4种不同类型直形边坡坡面降雨入渗速率在0~5 min时最大,此后随降雨历时增加先呈降低趋势,在25 min后趋于稳定,其平均稳定入渗速率分别为0.192,0.423,0.318,0.422 mm/min,其中未种植裸坡入渗速率相对较低,且降低幅度最大,为65.34%,而种植垂穗披碱草及老芒麦边坡入渗速率相对较大,降低幅度分别为20.84%,22.63%,其次为种植

细茎冰草边坡,降低幅度为 43.53%。由此可知,在直形边坡中,种植草本边坡增大边坡坡面土壤入渗速率,可延缓产流和有效拦截地表径流形成。此外,曾建辉等^[27]采用模拟降雨研究秸秆长度和覆盖量对坡面产流产沙的影响机制表明,植被覆盖度能显著影响产流产沙量及入渗率,即在降雨 1 h 后与未种植裸坡相比较,坡面产流量降低 19.5%,产沙量降低 31.6%,与本研究结果相似。

3.2.3 相同草本植物在不同坡形条件下坡面土壤入渗率及其特征 通过比较种植垂穗披碱草直形边坡与阶梯形边坡土壤入渗率可知,在种植相同植物条件下,直形边坡土壤初始入渗率和稳定入渗率均低于

阶梯形边坡,且种植垂穗披碱草阶梯形边坡入渗速率随降雨历时增加保持稳定,其平均入渗速率为 0.519 mm/min,相比于种植垂穗披碱草直形边坡,其入渗速率增加幅度为 20.30%。表明阶梯形边坡可增加坡面土壤入渗速率,其主要原因在于阶梯形边坡改变了坡地的地形,使坡面局部变成水平面,从而截断径流的产生,起到增加入渗速率的作用^[28]。另外,向宇国等^[29]对四川凉山彝族自治州会东县植烟坡耕地通过模拟降雨研究坡面产流、产沙随降雨强度及坡度变化特征表明,在雨强分别为小雨、中雨和大雨条件下,随着坡度增加坡面径流系数呈逐渐增大的变化规律,其最大增幅为 62.2%,与本研究结果类似。

表 1 试验区 2 种不同坡形条件下入渗速率与模拟降雨时间

模拟降雨 时间/min	直形边坡入渗速率/(mm·min ⁻¹)				阶梯形边坡入渗速率/(mm·min ⁻¹)	
	裸坡	垂穗披碱草	细茎冰草	老芒麦	裸坡	垂穗披碱草
5	0.473	0.482	0.509	0.499	0.515	0.519
10	0.300	0.467	0.445	0.467	0.463	0.513
15	0.308	0.442	0.383	0.442	0.431	0.514
20	0.275	0.432	0.358	0.439	0.431	0.506
25	0.201	0.428	0.331	0.434	0.377	0.504
30	0.184	0.404	0.347	0.386	0.336	0.504
35	0.218	0.381	0.326	0.414	0.342	0.505
40	0.217	0.425	0.355	0.428	0.340	0.509
45	0.164	0.440	0.319	0.418	0.336	0.509
50	0.216	0.434	0.287	0.431	0.318	0.508
55	0.169	0.429	0.322	0.437	0.319	0.511
60	0.167	0.431	0.301	0.402	0.272	0.508

3.3 模拟降雨条件下边坡坡面土体含水量分布特征

3.3.1 直形边坡坡面土体含水量分布特征 在开展模拟降雨试验过程中,由降雨初期至降雨结束 300 min 内每隔 30 min 采集 1 次含水量数据,测量区内 2 种不同坡形边坡不同位置及坡面地表以下 3 种不同深度土体含水量和分布特征。从图 4 可以看出,在模拟降雨试验 60 min 过程中,4 种不同类型边坡地表以下 3 种不同深度土体含水量呈显著增加变化趋势。在降雨试验开始 60 min 时,区内 4 种类型边坡顶部和底部 15,30 cm 处和边坡顶部 50 cm 深度土体含水量出现峰值,且地表以下 50 cm 处含水量最低,15 cm 处最高,而种植垂穗披碱草及老芒麦边坡在 3 种不同深度土体峰值含水量相近,均高于种植细茎冰草边坡。以未种植裸坡地表以下 50 cm 处土体含水量为例,种植垂穗披碱草、细茎冰草及老芒麦边坡的增加幅度分别为 27.63%,23.76%,22.68%,与降雨试验开始时相比较,地表以下 15 cm 深度坡底土体含水量增加幅度为 65.58%~90.40%,坡顶增加幅度为

53.05%~128.03%;相应地,地表以下 30 cm 深度处坡底土体含水量增加幅度为 47.40%~105.55%,坡顶增加幅度为 51.79%~69.67%;地表以下 50 cm 深度处坡底土体含水量增加幅度为 11.59%~30.72%,坡顶增加幅度为 12.81%~34.10%。由此可知,地表以下 15,30 cm 处其坡顶、坡底土体含水量增加幅度显著高于地表以下 50 cm 处。

在降雨结束后,地表以下 15 cm 深度坡底土体含水量降低幅度为 21.19%~31.74%,坡顶降低幅度为 29.51%~48.28%;30 cm 深度坡底土体含水量降低幅度为 20.81%~40.83%,坡顶降低幅度为 26.46%~39.19%;50 cm 深度坡底土体含水量降低幅度为 8.53%~20.18%,坡顶降低幅度为 6.49%~26.68%。由此可知,地表以下 50 cm 深度坡底和坡顶土体含水量降低幅度显著低于地表以下 15,30 cm。产生该现象原因在于,区内模拟降雨结束后边坡土体内水分移动并未立刻结束,土壤水分在重力势和基质势综合作用下,表现出由水势高向水势低方向运移,故降雨试

验结束后, 边坡土体内水分则表现出由坡顶向坡底方向运移, 其结果使得边坡底部土体含水量峰值出现时

间较顶部晚, 且在地表以下 50 cm 深度土体含水量降低幅度显著低于地表以下 15, 30 cm^[30]。

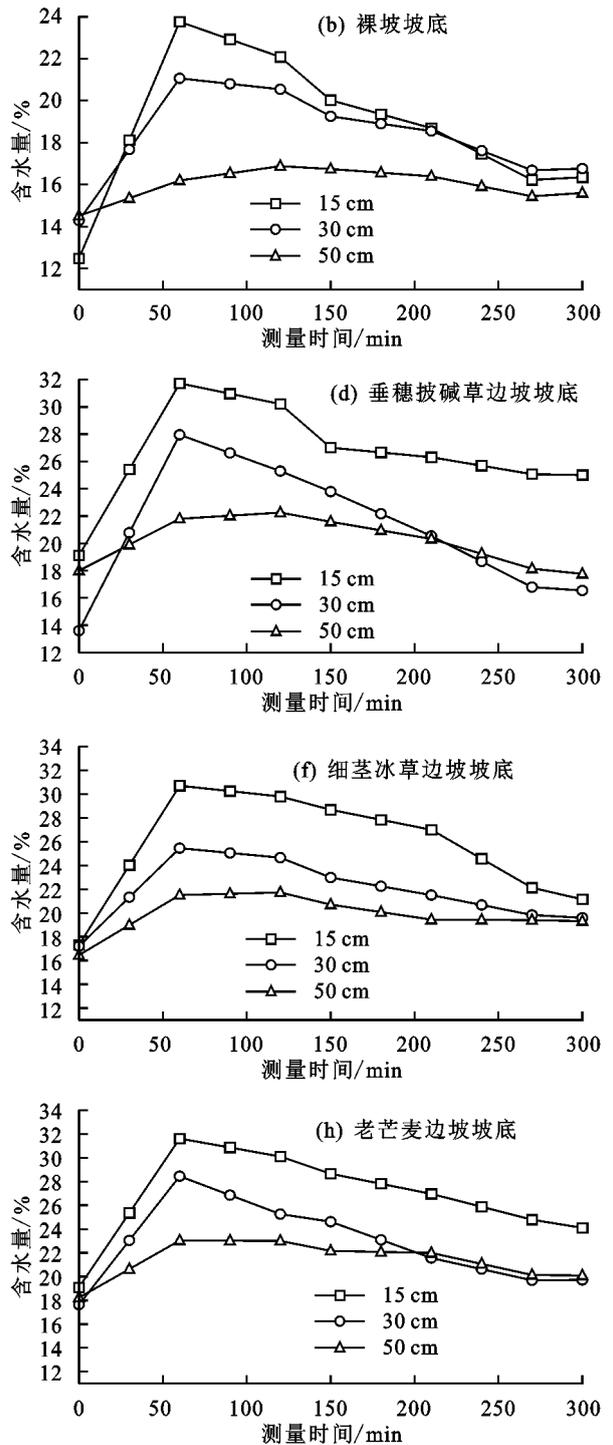
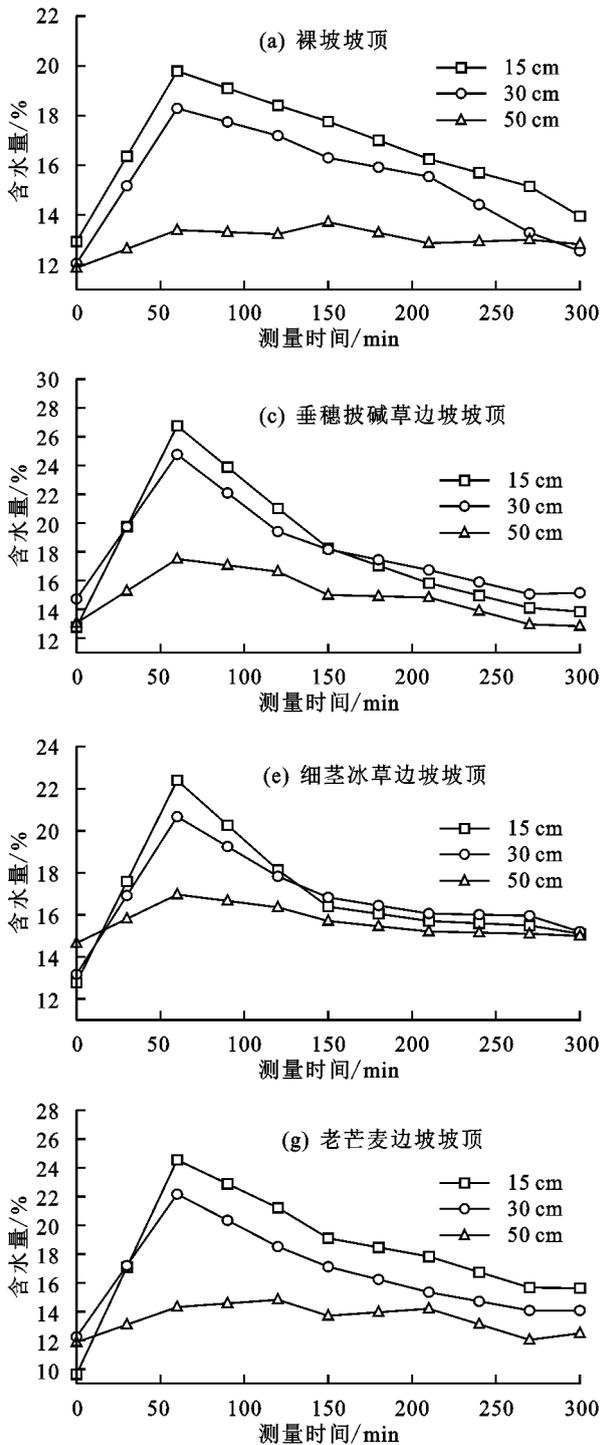


图 4 试验区模拟降雨过程中直形边坡坡面地表以下 3 种不同深度土体含水量分布特征

由图 4 还可看出, 与未种植裸坡相比较, 在降雨历时为 0~60 min 时, 草本边坡地表以下 3 种不同深度土体含水量增加幅度相对较高, 且草本边坡土体含水量峰值表现出显著大于未种植裸坡, 其中, 种植垂穗披碱草、老芒麦边坡土体含水量峰值及在 0—50 cm 深度土体含水量增幅相对最高, 在坡顶位置处增加幅度分别为 34.10%~109.66%, 17.65%~128.03%, 在坡底增加幅度分别为 21.11%~105.55%, 26.39%~65.58%, 而

未种植裸坡含水量峰值及在地表以下 0—50 cm 土体含水量增幅在坡顶为 12.81%~53.05%, 在坡底为 11.59%~90.40%。由此可知, 有植被边坡在降雨时能提高边坡土体含水量。

3.3.2 阶梯形边坡坡面含水量分布特征 从图 5 可以看出, 在模拟降雨过程中, 裸坡和种植垂穗披碱草边坡地表以下 0—50 cm 处其坡顶位置处含水量增幅分别为 30.18%~96.67%, 16.53%~95.72%, 坡底增幅分别为

4.70%~39.11%, 34.32%~75.93%; 在降雨历时为 60 min 时, 裸坡和垂穗披碱草边坡在地表以下 15, 30 cm 处土体含水量达到峰值, 即在坡顶分别为 25.37%, 25.73%

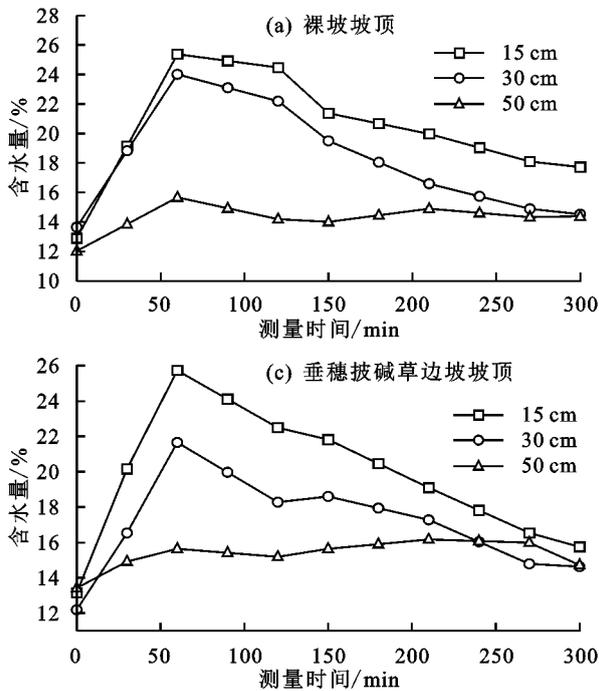


图 5 试验区模拟降雨过程中阶梯形边坡坡面地表以下 3 种不同深度土体含水量分布特征

3.3.3 相同草本植物在不同坡形条件下含水量分布特征 为说明同种草本在不同坡形时含水量分布特征, 以不同类型边坡底部地表以下 15 cm 处土体含水量为例(图 6)可知, 2 种不同坡形坡面土体含水量变化趋势相近, 而在降雨试验开始 0~60 min 时阶梯形边坡土体含水量增幅高于直形边坡, 在降雨试验结束后阶梯形边坡土体含水量降低幅度(24.88%)同样高于直形边坡(21.19%)。产生该现象的主要原因在于降雨试验开始至 60 min 时, 阶梯形边坡由于地形改变使坡面存在“局部”水平状, 其结果导致垂直方向的坡面径流被横向的水平坡面拦截, 从而减少降雨形成的坡面径流, 延长水分入渗边坡土壤的时间, 在降雨试验结束后由于土体水分在重力势和基质势的综合作用下向地表更深处运移, 加上边坡表层土体水分蒸发和植物蒸腾作用, 导致边坡表层含水量降低。

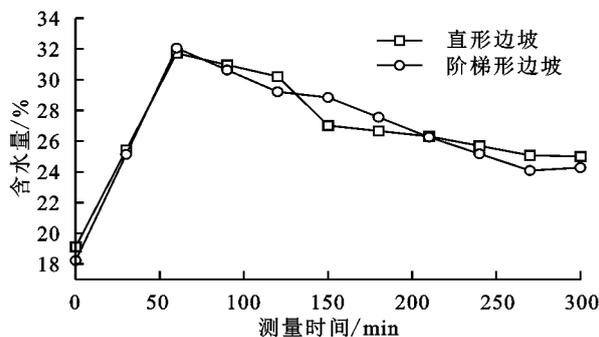
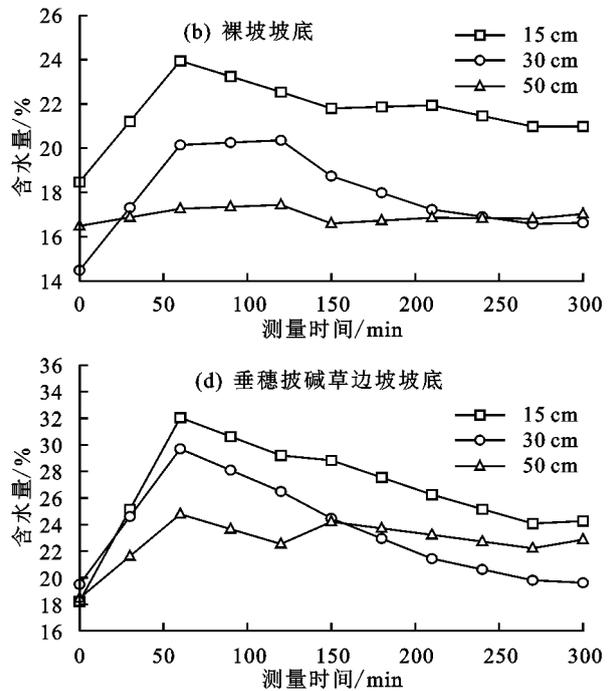


图 6 试验区 2 种不同坡形地表以下 15 cm 深度土体含水量分布特征

和 24.00%, 21.67%, 在坡底分别为 23.94%, 32.06% 和 20.15%, 29.71%。由此在降雨和不同坡形条件下, 植被能增加边坡土壤水分入渗, 以提高边坡土体含水量。



3.4 坡面土壤入渗过程模拟评价

3.4.1 3 种不同模型模拟结果 本研究采用 Kostiaikov 模型、Horton 模型及通用经验模型, 对区内 2 种不同坡形边坡土壤水分入渗过程进行拟合分析(表 2)。其中, 在 Kostiaikov 模型中 a 、 b 值分别代表初始入渗率及入渗速率随时间衰减速度快慢, 即 b 值愈大, 入渗速率降低愈快; 在 Horton 模型中 i_c 、 i_o 、 k 值分别代表其稳定入渗率、初始入渗率和土壤特性参数; 在通用经验模型中 a 、 b 值分别代表其稳定入渗率和初始入渗率。由表 2 可知, Kostiaikov 模型中, 2 种不同形状边坡裸坡初始入渗率最大, 分别为 0.88, 0.76 mm/min, 2 种不同坡形边坡模拟初始入渗率与实际初始入渗率有较大的差别, 反映出 Kostiaikov 模型拟合效果不显著; b 值同样表现为裸坡最大, 分别为 0.41, 0.22 mm/min, 而在 2 种不同形状边坡中种植草本边坡其初始入渗率(a 值)及 b 值均有明显下降, 说明植被可增加土体水分入渗, 降低土体水分入渗速率的变化速率。

在 Horton 模型模拟结果中, 土壤稳定入渗率在 2 种不同形状边坡中均表现为裸坡最小(0.18, 0.26 mm/min), 在种植垂穗披碱草边坡最大(0.43, 0.51 mm/min), 这与试验所测得实际土壤稳定入渗率基本相一致, 但初始入渗率较实际值高, 且土壤特性参数值相差较大。此外, 樊才睿等^[31]利用 Horton 模型

模拟内蒙古呼伦贝尔新巴尔虎右旗宝东苏木 3 种不同放牧强度草地入渗过程表明,拟合得到的稳定入渗速率(1.50~2.08 mm/min)与实测值相差较小,

其变化规律相对一致,但拟合得到的初始入渗速率(6.86~7.25 mm/min)与实际值相比相对较高,与本研究结果基本一致。

表 2 试验区 2 种不同坡形土壤水分入渗过程 3 种模型模拟结果

边坡形态	边坡类型	Kostiakov 模型			Horton 模型			通用经验模型				
		a	b	R^2	i_c	i_o	k	R^2	a	b	n	R^2
直形边坡	裸坡	0.88	0.41	0.91	0.18	0.64	0.10	0.91	0.12	1.11	0.71	0.92
	垂穗披碱草	0.51	0.04	0.74	0.43	0.54	0.14	0.90	0.42	0.29	0.97	0.86
	细茎冰草	0.70	0.21	0.92	0.31	0.62	0.09	0.94	0.22	0.65	0.50	0.94
阶梯形边坡	老芒麦	0.55	0.07	0.82	0.42	0.56	0.11	0.87	0.40	0.31	0.72	0.87
	裸坡	0.76	0.22	0.93	0.26	0.56	0.04	0.95	0.24	0.51	0.42	0.83
	垂穗披碱草	0.52	0.01	0.60	0.51	0.53	0.13	0.74	0.51	0.06	0.97	0.70

进一步分析可知,通用模型模拟结果与 Horton 模型模拟结果相似,即土壤稳定入渗率在 2 种不同坡形中均为裸坡最小(0.12, 0.24 mm/min),在种植垂穗披碱草边坡最大(0.42, 0.51 mm/min),与实际值基本相一致,初始入渗率较实际值高。

3.4.2 直形边坡土壤水分入渗模拟结果评价 由表 2 可知,不同模型对区内不同类型边坡土壤水分入渗过程的模拟结果存在一定差异,表现为在直形边坡 Kostiakov 模型模拟结果中对未种植裸坡和种植细茎冰草边坡拟合效果较好,其相关系数分别为 0.94, 0.92;在 Horton 模型模拟结果中 4 种不同类型边坡的拟合效果均较好,其相关系数最低为 0.87,其余 3 种边坡其相关系数均大于 0.90;在通用经验模型模拟结果中对 4 种不同类型边坡也有较好的拟合效果,对未种植裸坡及种植细茎冰草边坡具有较好的拟合效果,其相关系数分别为 0.92, 0.94。

基于以上模型拟合结果,区内直形边坡其相关系数(R^2)以 Horton 模型相对最高,其次为通用经验模型, Kostiakov 模型最低,故 Horton 模型和通用经验模型可作为是描述该类边坡土壤入渗效果相对较为理想的模型。与本项研究相类似的研究还表现在,赵炯昌等^[32]采用 Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型模拟甘肃定西安家坡小流域坡面入渗特征表明,3 种模型其相关系数(R^2)平均值分别为 0.87, 0.93, 0.99,反映出采用 Horton 模型可作为描述该地区坡面入渗过程的理想模型。

3.4.3 阶梯形边坡土壤水分入渗模拟结果评价 由表 2 可知,区内阶梯形未种植裸坡拟合模型中,对于未种植裸坡 Kostiakov 模型及 Horton 模型拟合效果较好,其相关系数分别为 0.93, 0.95,通用经验模型拟合效果相对较差;在种植垂穗披碱草边坡中, Horton 模型拟合效果相对最好($R^2 = 0.74$),其次为通用经验模型($R^2 = 0.70$), Kostiakov 模型模拟效果相对较差

($R^2 = 0.60$)。由此可知, Horton 模型对阶梯形边坡土壤入渗过程拟合效果较为理想,可作为区内边坡土壤水分入渗模拟的理想模型。

3.5 影响种植草本植物边坡坡面土壤入渗主要因素及其特征

3.5.1 土壤有机质 由表 3 可知,区内 2 种不同坡形边坡中有机质含量以种植细茎冰草边坡最大,为 8.74 g/kg,其次为种植老芒麦边坡,其含量为 7.94 g/kg。由表 4 可知,区内边坡土壤有机质与土壤初始入渗率和稳定入渗率均呈正相关关系,且土壤有机质与土壤初始入渗率间呈显著正相关关系($R^2 = 0.986$),表明区内边坡土壤有机质含量愈高其土壤入渗能力则愈强。张润霞等^[33]通过圆盘入渗仪进行土壤入渗试验分析兰州新区 6 种不同土地利用类型的土壤入渗及其影响因素表明,土壤有机质与土壤入渗率呈正相关,与稳定入渗率呈显著正相关($R^2 = 0.813$),与本研究结果相似。

3.5.2 土壤初始含水量 由表 3 可知,区内 4 种不同类型直形边坡土壤初始含水量中,未种植裸坡初始含水量相对最低,为 13.19%,种植细茎冰草直形边坡初始含水量最大,为 17.28%;2 种不同类型阶梯形边坡土壤初始含水量表现为种植垂穗披碱草边坡显著大于未种植裸坡。由表 4 可知,区内土壤初始含水量与土壤初始入渗率和稳定入渗率间的相关系数(R^2)分别为 0.901 和 0.669,且呈正相关关系。

3.5.3 土壤密度 由表 3 可知,区内 2 种不同坡形边坡中裸坡土体密度相对最低,为 1.28 g/cm³,种植老芒麦直形边坡土体密度最高,为 1.38 g/cm³。由表 4 可知,区内边坡土壤密度与土壤初始入渗率呈负相关关系,相关系数(R^2)为 -0.010,土壤密度与土壤稳定入渗率间的相关系数(R^2)为 0.629,呈正相关关系,其相关系数相较其他影响因素相关系数低,说明土壤密度对土壤初始入渗率和稳定入渗率影响不显著。

3.5.4 植被覆盖度 由表 3 可知,区内种植垂穗披碱草阶梯形边坡植被覆盖度较其他种植边坡表现出相对较低的特征,为 10.74%,种植老芒麦直形边坡覆盖度最高,为 32.89%。由表 4 可知,植被覆盖度与边坡土壤初始入渗率和稳定入渗速率间呈正相关关系,且植被覆盖度与稳定入渗率呈极显著相关关系(R^2 为 0.997),这说明植被覆盖度对区内边坡坡面稳定入渗率的影响程度相对较明显,即植被覆盖度愈高其土壤稳定入渗率愈大。李坤等^[34]采用野外人工模拟降雨研究甘肃天水罗玉沟流域草地覆盖度变化对土壤入渗过程影响表明,随着植被覆盖度增加,其土壤稳定入渗率显著增大,且初始入渗率与稳定入渗率比值由 3.33 降低至 1.45,与本研究结果类似。

表 3 试验区 2 种不同坡形不同类型边坡土壤入渗影响因素试验测试结果

边坡形态	边坡类型	土壤密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	初始含水量/%	有机质含量/ ($g \cdot kg^{-1}$)	植被覆盖度/%
直形边坡	裸坡	1.28	13.19	7.79	0
	垂穗披碱草	1.32	15.83	7.29	19.61
	细茎冰草	1.25	17.28	8.74	24.35
	老芒麦	1.38	16.30	7.94	32.89
阶梯形边坡	裸坡	1.28	12.18	6.93	0
	垂穗披碱草	1.34	15.38	5.84	10.74

表 4 试验区边坡土壤入渗特性与影响因子相关性分析结果

入渗特征	土壤密度	初始含水量	有机质	植被覆盖度
初始入渗率	-0.010	0.901	0.986*	0.393
稳定入渗率	0.629	0.669	0.303	0.997**

注: * 和 ** 分别表示相关系数显著性达 0.05 和 0.01 水平。

4 讨论

由已有研究结果^[35-37]可知,坡形和植被类型及其盖度是影响坡面土壤水文参数的主要因素,植被可通过茎叶作用防治坡面水土流失,坡形亦影响坡面土壤入渗现象。但研究结果多为单一植被条件下,在坡形方面一般为直形坡、凹形坡、凸形坡,其一般结论为植被能增大土壤入渗率,抑制地表径流,而直形坡、凸形坡、凹形坡对地表径流及土壤入渗等的影响尚未有一致性结论。在涉及直形坡与阶梯形坡 2 种坡形条件及不同种类植被条件下,对坡面土壤水文参数变化的研究还相对较少;此外,已有研究^[38]结果表明,径流是水循环的基本环节,径流对土壤具有侵蚀和直接挟带的双重作用,是导致水土流失的重要因子,也是自然地理环境中最为活跃的因素之一,土壤入渗是水循环和径流形成过程的重要环节,边坡土壤含水量变化可以直观反映坡面土壤水分运动趋势。因此,本研究以西宁盆地自建试验区为例,选取坡面累积径流量、

地表以下 0—50 cm 土体含水量、坡面土壤入渗率为主要研究参数,在此基础上选取 3 种入渗模型对入渗过程进行模拟,为进一步开展西宁盆地植物边坡土壤入渗水文参数研究提供理论依据。

本研究表明,在不同植被条件下 4 种直形边坡产流时间相差较小,2 种阶梯形边坡产流时间差距明显,2 种坡形条件下均表现为裸坡产流时间相对最短,在相同坡形条件下裸坡累积径流量显著高于其他坡面。在相同植被不同坡形条件下阶梯形边坡显著降低径流量。与此同时,直形边坡与阶梯形边坡中裸坡初始入渗率和稳定入渗率均低于相同坡形种植植被坡面,原因在于植物根系在土体中穿插、缠绕能够改善土壤空隙状况,在降雨条件下为土壤入渗提供优势通道,从而能够增加土壤渗透性^[39],而阶梯形裸坡与直形裸坡、阶梯形垂穗披碱草边坡与直形垂穗披碱草边坡相比,阶梯形边坡显著提高土壤初始入渗率及稳定入渗率,说明阶梯形边坡土壤水渗透能力优于直形边坡。

此外,自试验开始至结束 300 min 内,试验区边坡坡面地表以下 0—30 cm 土体含水量均在试验开始 60 min,即降雨试验结束时出现最大值,随后随时间增加而降低,最终趋于稳定,且直形裸坡与阶梯形裸坡其土体含水量在相同坡形条件下均为最低,进一步反映出植被能增加边坡土壤入渗;而直形边坡其坡底位置处地表以下 0—30 cm 处土体含水量变化幅度相对低于坡顶处,其原因在于受坡形及重力势、基质势影响,土壤水分运动并未停止,且向地表深处及边坡底部运动,使边坡坡面径流在坡底处汇集,这也导致区内地表以下 50 cm 深度处土体含水量最大值未出现在降雨试验结束时,而是在降雨试验结束后含水量继续增加随后趋于稳定;而阶梯形边坡坡顶坡底处土体含水量变化幅度相似,原因在于阶梯形边坡局部水平坡面截断径流,使在每个水平坡面径流量在坡底处径流汇集较少。

在所选取的 4 种影响因素中,2 种坡形土壤密度及含水率相差较小,而阶梯形边坡土壤有机质较低,主要表现为土壤扰动及水土流失的共同作用。此外,由 3 种常见入渗模型的拟合结果可知,Horton 模型对 2 种坡形的拟合程度均优于其余模型,其次为通用经验模型。在 Kostikov 模型中由公式可知其起始入渗率假设为无穷大^[40],随降雨时间无限增长后趋于零,这在水平入渗条件下可能实现,但垂直入渗时其动力势不可能为零,故其垂直入渗速率亦不可能为零。基于此,故 Kostikov 模型拟合效果较其他模型低,而本研究在模拟过程中并未考虑种植植物根系其

地下构型的影响,而仅考虑植被存在条件对边坡土壤入渗的影响,有关这方面的内容也是本课题组后续研究中需要进一步深入研究的内容。

5 结论

(1)区内种植的垂穗披碱草阶梯形边坡产流时间相对最晚,直形裸坡阶段累积径流量最大,其最大阶段累积径流量在降雨试验 40~45 min 时为 17 730 mL。

(2)2 种不同坡形边坡坡面平均稳定入渗速率由大到小依次为阶梯形垂穗披碱草边坡(0.519 mm/min)、直形垂穗披碱草边坡(0.423 mm/min)、直形老芒麦边坡(0.422 mm/min)、直形细茎冰草边坡(0.318 mm/min)、阶梯形裸坡(0.321 mm/min)和直形裸坡(0.192 mm/min)。

(3)区内直形边坡与未种植裸坡相比较,种植垂穗披碱草和老芒麦边坡土体含水量在地表以下 0—50 cm 土层土体含水量增幅相对最高,在坡顶增加幅度分别为 34.10%~109.66%,17.65%~128.03%,在坡底增加幅度分别为 21.11%~105.55%,26.39%~65.58%。

(4)对区内 2 种不同坡形边坡土壤入渗过程分别采用 Horton 模型、Kostiakov 模型和通用经验模型进行模拟表明,在 4 种不同类型直形边坡中,其土壤入渗过程以 Horton 模型和通用经验模型的拟合效果较为理想;2 种不同类型阶梯形边坡土壤入渗过程以 Horton 模型的拟合效果最优。

(5)通过采用 Pearson 相关性分析得出,区内边坡土壤入渗特性主要影响因素为土壤有机质与植被覆盖度,其中土壤有机质与初始入渗率间呈显著正相关关系,相关系数(R^2)为 0.986,植被覆盖度与稳定入渗率呈极显著相关关系,相关系数(R^2)为 0.997。

参考文献:

[1] 李秀春.青海省生态水资源保护措施与改进研究[J].环境科学与管理,2019,44(3):168-172.

[2] 张瑜.论加强西宁市水源涵养林建设的思路与对策[J].现代园艺,2021,44(18):181-182.

[3] Valdemir A, Enaiale C de P, João A B, et al. Soil and water losses along the cultivation cycle of onion in Irati, Brazil[J].Catena,2021,204:1-7.

[4] Liu B Y, Xie Y, Li Z G, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China[J].International Soil and Water Conservation Research,2020,8(4):430-439.

[5] 嵇晓雷,杨平.不同降雨强度下植被护坡对边坡位移的影响[J].林业工程学报,2020,5(5):152-156.

[6] 龙诚璧,胡伟,李光范,等.热带不同植被边坡水文效应室内模型试验[J].科学技术与工程,2019,19(32):383-388.

[7] Wang D D, Yuan Z J, Cai Y T, et al. Characterisation

of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions: A review[J].Journal of Environmental Management,2021,285:1-6.

[8] 于晓杰,魏勇明.不同坡形坡面侵蚀产沙过程的影响研究[J].水土保持研究,2017,7(1):97-100.

[9] 靳洋,孙希华,陈凤琴.鲁中山区坡面尺度下的土壤侵蚀特征分析[J].江苏农业科学,2019,47(21):309-312.

[10] Rieke-Zapp D H, Nearing M A. Slope shape effects on erosion: A laboratory study[J].Soil Science Society of America Journal,2005,69(5):1463-1471.

[11] 徐勤学,李春茂,陈洪松,等.喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J].农业工程学报,2018,34(8):124-131.

[12] 姚单君,任维,王震洪,等.贵阳市花溪河岸喀斯特带地表径流中磷流失和土壤入渗分析[J].山地农业生物学报,2017,36(1):54-60.

[13] 郑凯利,邓东周.若尔盖湿地土壤入渗性能及其影响因素[J].水土保持研究,2019,26(3):179-184,191.

[14] Wang J L, Song J Y, Lin H J, et al. Comparison of infiltration models to describe infiltration characteristics of bioretention[J].Journal of Hydro-environment Research,2021,38:35-43.

[15] 崔艳红,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析[J].北京林业大学学报,2021,43(1):77-87.

[16] Fariba B, Ali A Z, Mohammad R Y, et al. Spatial analysis of infiltration in agricultural lands in arid areas of Iran[J].Catena,2018,170:25-35.

[17] 石明章,索生睿,祁栋林.1961—2015 年西宁市降水变化特征分析[J].现代农业科技,2018(2):198-200.

[18] 许海燕.青海乡土植物园林绿化应用研究进展[J].现代园艺,2020(7):22-23.

[19] 王春林.西宁市南北山林木生长量调查及树种选择分析研究[J].现代农业科技,2014(21):151-152,155.

[20] Duan J, Liu Y J, Tang C J, et al. Efficacy of orchard terrace measures to minimize water erosion caused by extreme rainfall in the hilly region of China: Long-term continuous in situ observations[J].Journal of Environmental Management,2021,278:1-15.

[21] 陈洪松.黄土区坡地土壤水分运动与转化试验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2003.

[22] 王一博,吕明侠,赵海鹏,等.青藏高原多年冻土区活动层土壤入渗特征及机理分析[J].冰川冻土,2021,43(5):1301-1311.

[23] Kostiakov A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[C].Transactions of the Sixth Commission of the International Society of Soil Science, Part A, Russian,

- 1932:17-21.
- [24] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1941, 5: 399-417.
- [25] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.
- [26] 李姜瑶, 缪晓星, 王延秀, 等. 西宁盆地黄土区不同草本植物和坡形条件下坡面产流产沙特征[J]. 盐湖研究, 2022, 30(1): 33-45.
- [27] 曾建辉, 李占斌, 马波, 等. 小麦秸秆长度、覆盖量对坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 98-103, 111.
- [28] 李仕华. 梯田水文生态及其效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [29] 向宇国, 张丹, 陈凡, 等. 降雨和坡度对植烟坡耕地产流产沙的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(5): 1121-1127.
- [30] 包含, 侯立柱, 刘江涛, 等. 室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 70-75.
- [31] 樊才睿, 张成福, 史小红, 等. 草甸草原不同放牧强度草地土壤水分入渗特征[J]. 节水灌溉, 2020(3): 27-31.
- [32] 赵炯昌, 潘岱立, 卫伟, 等. 植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1373-1380.
- [33] 张润霞, 赵学勇, 李晶, 等. 干旱荒漠区土地利用方式快速转变对土壤入渗性能的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 146-153.
- [34] 李坤, 姚文艺, 肖培青, 等. 黄丘区自然草地对坡面土壤入渗的影响机制[J]. 人民黄河, 2017, 39(6): 82-85, 98.
- [35] Li Q, Shi X Y, Wu Q Q. Exploring suitable topographical factor conditions for vegetation growth in Wanhuigou catchment on the Loess Plateau, China: A new perspective for ecological protection and restoration[J]. Ecological Engineering, 2020, 158: 1-10.
- [36] Wei C, Behzad A O, Lei Y K, et al. Studying early stage slope protection effects of vegetation communities for Xinnan Highway in China[J]. Ecological Engineering, 2018, 110: 87-98.
- [37] 刘栋. 北京市门头沟地区不同水土保持措施的减水减沙效益[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 107-110.
- [38] 黄锡荃, 李慧明, 金伯欣. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [39] 王鑫皓, 王云琦, 马超, 等. 根系构型对土壤渗透性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 73-82.
- [40] 韩冰, 吴钦孝, 李秧秧, 等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤入渗特征的研究[J]. 防护林科技, 2004(5): 1-3, 49.
- (上接第 29 页)
- [34] Mohammed S, Hussien M, Alsafadi K, et al. Assessing the WEPP model performance for predicting daily runoff in three terrestrial ecosystems in western Syria [J]. Heliyon, 2021, 7(4): e06764.
- [35] Nearing M A, Deer-Ascough L, Laflen J M. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model [J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3): 839-849.
- [36] Laflen J M, Flanagan D C, Engel B A. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP1 [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(2): 289-297.
- [37] Pandey A, Himanshu S K, Mishra S K, et al. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited[J]. Catena, 2016, 147: 595-620.
- [38] Saghafian B, Meghdadi A R, Sima S. Application of the WEPP model to determine sources of run-off and sediment in a forested watershed: Using WEPP for run-off and sediment simulation in a forested watershed [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(4): 481-497.
- [39] Grønsten H A, Lundekvam H. Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the WEPP Hillslope model[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1/2): 186-199.
- [40] Albaradeya I, Hani A, Shahrour I. WEPP and ANN models for simulating soil loss and runoff in a semi-arid Mediterranean region [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 180(1/4): 537-556.
- [41] Nasir N, Selvakumar R. Influence of land use changes on spatial erosion pattern, a time series analysis using RUSLE and GIS: The cases of Ambuliyar sub-basin, India[J]. Acta Geophysica, 2018, 66(5): 1121-1130.
- [42] 安娟. 东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.
- [43] 邢伟民, 王德潼, 徐浩林, 等. 坡形和 PAM 对黄土坡地水土养分迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 135-142.
- [44] 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.
- [45] Wu S B, Chen L, Wang N L, et al. Two-dimensional rainfall-runoff and soil erosion model on an irregularly rilled hillslope [J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: e124346.