

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.046.

何伟鹏, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 不同植物对黄土边坡产流产沙与抗剪强度的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 18-26.

HE Weipeng, HU Xiasong, LIU Changyi, et al. Effects of Different Plants on Runoff and Sediment Yield and Shear Strength of Loess Slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 18-26.

不同植物对黄土边坡产流产沙与抗剪强度的影响

何伟鹏¹, 胡夏嵩¹, 刘昌义¹, 缪晓星², 王延秀²,
付江涛³, 卢海静⁴, 邢光延⁴, 赵吉美⁴, 杨馥铖¹, 刘亚斌¹

(1.青海大学 地质工程系, 西宁 810016; 2.青海省水土保持中心, 西宁 810000;
3.青海大学 农林科学院, 西宁 810016; 4.青海大学 农牧学院, 西宁 810016)

摘要:[目的]探讨不同草本植物对黄土边坡产流产沙与抗剪强度特征的影响,为进一步开展高寒干旱和半干旱地区,有效防治因降雨诱发水土流失、浅层滑坡等地质灾害,提供理论依据和实际指导。[方法]在西宁盆地长岭沟流域自建试验区,选取垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、老芒麦(*Elymus sibiricus*)、细茎冰草(*Agropyron trachycaulum*)3种优势草本植物为试验供试种,开展原位人工模拟降雨试验与室内直剪试验,分析了模拟降雨条件下6种不同类型植物边坡坡面产流产沙及根—土复合体抗剪强度特征。[结果]在模拟降雨条件下,草本植物能显著抑制坡面产流产沙,阶梯形边坡相对直形边坡能显著降低坡面产流产沙,且随着草本生长期增加坡面产流产沙显著降低,生长期为2a的种植垂穗披碱草阶梯形边坡坡面累积产沙量较垂穗披碱草直形边坡降幅为79.68%,生长期为1a的种植垂穗披碱草阶梯形边坡平均产沙率较阶梯形未种植裸坡降低幅度最大为86.27%,表明种植垂穗披碱草阶梯形边坡有效抑制坡面的产流能力相对显著;进一步研究表明,降雨使边坡土体平均含水率增大,导致边坡浅层土体黏聚力降低;与直形边坡相比较,模拟降雨后阶梯形边坡黏聚力 c 值降低幅度较小,其中种植垂穗披碱草阶梯形边坡较降雨前降低幅度为19.25%,表明垂穗披碱草阶梯形边坡其增强边坡土体强度效果相对最显著。[结论]垂穗披碱草阶梯形边坡表现出相对更显著的抑制边坡水土流失和提高边坡浅层土体抗剪强度,起到增强边坡土体稳定性的作用。

关键词:黄土区; 寒旱环境; 植物边坡; 产流产沙; 抗剪强度; 根—土复合体

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)04-0018-09

Effects of Different Plants on Runoff and Sediment Yield and Shear Strength of Loess Slope

HE Weipeng¹, HU Xiasong¹, LIU Changyi¹, MIU Xiaoxing², WANG Yanxiu², FU Jiangtao³,
LU Haijing⁴, XING Guangyan⁴, ZHAO Jimei⁴, YANG Fucheng¹, LIU Yabin¹

(1.Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2.Qinghai Soil and Water Conservation Research Center, Xining 810000, China; 3.Academy of Agriculture and Forestry, Qinghai University, Xining 810016, China; 4.College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract:[Objective] The impact of different herbaceous species on sediment yields and shear strength of loess slope was investigated in order to provide theoretical basis and practical guidance for the further development of effective prevention and control of geological disasters such as soil erosion and shallow landslides caused by rainfall in alpine arid and semi-arid areas. [Methods] The Changlinggou Catchment located in Xining Basin was selected as the testing area, three indigenous predominant herbs (*Elymus nutans*, *Elymus sibiricus* and *Agropyron trachycaulum*) were taken as the testing species and artificial rainfall was conducted

收稿日期:2022-07-15

修回日期:2022-09-21

资助项目:青海省自然科学基金(2020-ZJ-906);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905)

第一作者:何伟鹏(1994—),女,甘肃会宁人,硕士研究生,主要从事地质工程与环境地质等方面的研究工作。E-mail:1036762123@qq.com

通信作者:刘昌义(1991—),男,四川宜宾人,实验师,主要从事地质工程与环境地质等方面教学和科研工作。E-mail:1358128151@qq.com

<http://stbcj.paperonice.org>

to quantify the impact of slope types and herb types on the yield rate of sediment and runoff, and the rooted soils of the vegetated slopes were sampled to compare the impact of precipitation on the shear strength of slope soil. [Results] Under artificial rainfall, herbaceous plants significantly reduced in productions of runoff and sediments on the slope. Compared with straight slope, terraced slope significantly reduced runoff and sediment production on the slope. With the increase of herbaceous growth period, runoff and sediment productions on the slope decreased significantly. Among them, the cumulative sediment yield of the terraced slope of *E. nutans* with 2-years growing period decreased by 79.68% compared with the straight slope, and the average sediment yield of the terraced slope of *E. nutans* with 1-year decreased by 86.27% compared with the terraced bare slope, indicating their excellent capacities for refraining the yields of sediments and runoff in terraced slopes. Moreover, the mean moisture content in slope soil increased under rainfall situation, which led to a decrease of soil cohesion. Compared with the straight slope, cohesion of terraced slope exhibited a slight decrease, especially in *E. nutans* terraced slope, which decreased by 19.25%, indicating its excellence in increasing soil cohesion. [Conclusion] *E. nutans* terraced slope can effectively inhibit soil and water losses and enhance the shear strength of shallow soil, so as to improve the stability of the slope.

Keywords: loess region; cold and arid environment; plant slope; runoff and sediment yield; shear strength; root-soil composite system

黄土高原是世界上黄土分布最为集中、覆盖面积最大的黄土区^[1]。因其地理位置特殊,加之受到降雨和河流的侵蚀作用,导致黄土高原成为水土流失严重区、生态环境敏感区与脆弱区,同时也是地质灾害频发区^[2-3]。相关研究表明,大部分地质灾害均发生在降雨期间或降雨后^[4-5],青藏高原东北部黄土地区气候条件复杂,地质环境脆弱,植被稀疏,雨季常发生崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害,对生态环境造成很大影响^[6]。近年来,国内外诸多学者研究认为,影响边坡稳定性的关键是植物因子,且植被对边坡防护主要体现在水文效应和力学效应两方面,其中,前者表现在植物茎叶组织通过蒸腾作用降低坡面土体水分和孔隙水压力,同时能充分发挥植物降雨截留作用,起到减少雨水降落至坡面的有效雨量,从而保护地表土壤免受冲刷侵蚀;后者主要通过浅层根系的加筋作用、垂直深根的锚固作用以及侧根的斜向牵引作用,起到增强土体抗剪强度和提髙坡体稳定性作用^[7-8]。

已有研究表明,黄土丘陵区暴雨事件频发,土壤侵蚀严重,其中植被盖度、坡形、植被类型对坡面侵蚀具有显著性影响^[9]。Xia等^[10]以甘肃黄土丘陵沟壑区为研究区,通过模拟降雨探讨地表凋落物覆盖对该地区水土流失的影响,指出当凋落物质量为 800 g/m²时,凋落物覆盖样地的平均土壤流失率较裸地降低幅度最大为 78.3%。李智勇等^[11]以陕西杨凌西卜村为研究区,采用降雨模拟试验,研究苜蓿(*Medicago sativa*)在不同坡度和覆盖度下的径流速率、产沙速率,结果表明苜蓿可显著降低坡面径流速率,指出裸地的平均产

沙速率为 23.5 g/(m²·min),分别为苜蓿在低覆盖度和高覆盖度坡面的 8.6 倍和 13.7 倍。侯宁等^[12]选取四川盆地典型紫色土坡地作为研究对象,通过设计 5 种不同坡度(5°,10°,15°,20°和 25°)坡面,采用室内人工降雨进行降雨时长为 60 min,强度为 90 mm/h 的模拟降雨试验,结果表明,当坡度为 25°时,坡面累计产沙量增长比例最大为 83.95%。

相关研究表明,降雨对边坡稳定性的影响相对较为显著^[13-14],与此同时,诸多学者在植物根系增强土体强度和提髙边坡稳定性方面开展了大量研究。例如 Xu等^[15]以室内种植黑麦草(*Lolium perenne*)为研究对象,通过开展室内直剪试验,指出随生长期增加,根—土复合体抗剪强度呈显著性增大,表现在生长期为 28 d 时其抗剪强度最大为 28.75 kPa;并采用 FLAC 3D 模拟不同深度根—土复合材料直剪试验,结果表明在地表以下根系分布深度的 1/3~1/2 处,根—土复合体抗剪强度最大,反映出该模拟结果与室内直剪试验结果具有一致性。唐凛等^[16]以安徽境内大别山区典型重塑低液限黏土填料为研究对象,制备 4 种不同含水率(7.3%,11.3%,15.3%和 19.3%)重塑非饱和土试样,通过直剪试验探讨不同含水率对抗剪强度的影响,结果表明黏聚力与含水率之间呈指数函数负相关关系。林斌等^[17]以山西长治地区重塑红黏土为研究对象,通过开展直剪试验,表明随着含水率增加,黏聚力呈先增大后减小的变化规律,当含水率为 19.5%时黏聚力最大值为 16.66 kPa。李佳等^[18]以甘肃陇南为研究区,通过对杠柳(*Periploca*

sepium)等4种典型灌木根系开展重塑土直剪试验,结果表明黏聚力 c 值和内摩擦角 φ 值均随含水率增加而减小,其中杠柳其根—土复合体黏聚力 c 值减小幅度最大为81%。上述研究结果均表明,种植植物可增强边坡土体抗剪强度和增加边坡稳定性。

综上所述,目前有关边坡植被生态防护评价方面采用的方法较为单一,更多的研究表现为通过开展植物茎叶抑制坡面产流产沙作用研究植被护坡水文效应,其次通过开展植物根系增强土体强度研究植被护坡力学效应,而采用将这两种方法结合起来研究还相对较少。尤其是,针对青藏高原东北部黄土区,利用适宜当地气候条件生长的优势乡土植物,采用将植物护坡水文效应与力学效应相结合的方法进行研究,尚有待于进一步深入研究。基于此,本研究选取西宁盆地长岭沟流域自建试验区作为研究区,对区内6种不同植物边坡类型,采用人工模拟降雨和根—土复合体直剪试验,探讨区内不同坡形与草本对坡面产流产沙及降雨前后边坡土体抗剪强度的影响。本研究结果为进一步开展高寒干旱和半干旱地区,有效防治因降雨诱发水土流失、浅层滑坡等地质灾害,提供理论依据和实际指导。

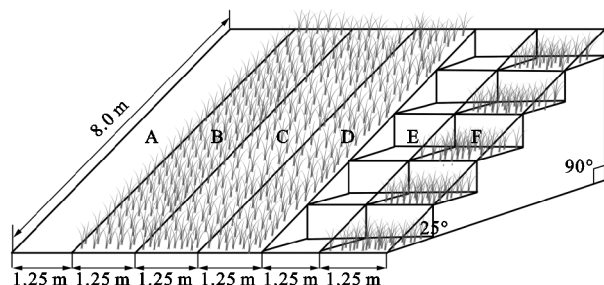
1 研究区概况

研究区位于黄土高原西缘与青藏高原东北部交接地带,隶属于湟水盆地,研究区地理位置为东经 $101^{\circ}42'$,北纬 $36^{\circ}36'$,海拔高度 $2\,315\sim 2\,570\text{ m}$ ^[19],地貌分布主要是丘陵、山地和河谷冲积平原^[20]。区内黄土高陡边坡较为发育,主要地质灾害类型为水土流失、滑坡、崩塌、泥石流以及土地盐渍化等^[21]。区内年平均降水量约为 350 mm ,且在年内分布不均,主要集中在5—9月,占全年降水量的70%~80%,年平均气温为 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$,蒸发量为 $1\,762.8\text{ mm}$ ^[22],其降水量少,蒸发强烈,属于高原大陆性半干旱气候^[23]。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

自建试验区坡向朝北,坡度约为 25° ,土质为粉土^[24]。该试验种植区划分出6块坡长为 800 cm ,坡宽为 125 cm 规格的小区,并设直形和阶梯形2种类型边坡。课题组于2019年进行人工植被种植试验,在区内选取适应当地气候、根系发达的3种优势草本植物,即垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、老芒麦(*Elymus sibiricus*)、细茎冰草(*Agropyron trachycaulum*),采用条播法进行播种,行距为 10 cm ^[25],并以未种植裸坡作为试验对照组。试验区种植方案见图1(据李姜瑶^[25];本文略作改动)。



注:A,B,C,D为直形边坡,E,F阶梯形边坡;A未种植裸坡;B种植垂穗披碱草边坡;C种植细茎冰草边坡;D种植老芒麦边坡;E未种植裸坡;F种植垂穗披碱草边坡。下同。

图1 试验区草本植物边坡种植试验设计方案示意图^[25]

2.2 试验方法

(1) 模拟降雨试验。本项研究课题组于2020年、2021年前往试验区开展野外降雨模拟试验。区内有效降雨面积为 $7.5\text{ m}\times 8\text{ m}$,设计降雨高度为 3 m 。人工模拟降雨试验装置由降雨控制装置、降雨装置、集雨槽3部分组成(图2)。根据青海省水土保持中心监测的2015—2019年期间西宁盆地长岭沟流域降雨数据可知,该区域最大降雨强度为 35.7 mm/h ,因此,将该值作为模拟降雨试验的降雨强度,降雨历时设置为 60 min 。在开展模拟降雨试验之前,预先开展现场降雨测试试验,以确保由9个喷头组成的降雨装置可同时进行降水且覆盖整个试验区边坡;与此同时,在边坡坡面四周及中央位置处共随机放置6个雨量筒作为测点进行降雨量测试,并得到本次模拟降雨试验的平均降雨量为 33.67 mm/h 。在此基础上,本研究采用均匀系数计算公式(1)得到本次模拟降雨试验的降雨均匀系数为 0.89 ,可达到野外模拟降雨试验要求,故本项研究中模拟降雨试验的降雨强度为 33.67 mm/h ,降雨历时为 60 min 。

$$k=1-\frac{\sum_{i=1}^n |x_i-\bar{x}|}{n\bar{x}} \quad (1)$$

式中: k 为均匀系数; x_i 为第 i 个测点降雨量(mm); \bar{x} 为各测点平均降雨量(mm); n 为测点数。

模拟降雨试验过程如下:从模拟降雨开始,每 5 min 采用集水桶收集一次每个边坡坡面的产流量与产沙量并进行编号,待降雨试验结束后分别进行称量和记录,得到每个时段内边坡坡面产生的泥沙量与径流量的总和;将称量完毕的水沙试样静置 24 h ,然后去除上层清液,并将剩下的泥沙样采用自然风干法进行风干,将风干后的样品,再次按照集流桶的编号进行称量及记录,最后称取空桶的重量,并将记录的数据进行整理,最后得到区内6种不同类型边坡随时间变化的径流量及产沙量。在本项研究中,所采用的边坡产流率的计算公式为:

$$R=\frac{M_{\text{总}}-M_{\text{沙}}}{\rho_{\text{水}}\cdot t}$$

(2)

相应地,边坡产沙率的计算公式为:

$$S=\frac{M_{\text{沙}}}{t}$$

(3)

式中: R 为每个样品的边坡产流率(L/min); $M_{\text{总}}$ 为收集每个样品的总径流泥沙样质量之和(g); $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度; $M_{\text{沙}}$ 为烘干泥沙质量(g); S 为每个样品的边坡产沙率(g/min); t 为收集每个样品所用时间(min)^[26]。

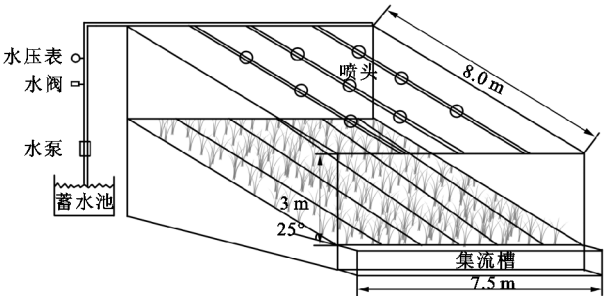


图 2 试验区边坡模拟降雨试验装置结构示意图^[25]

(2) 草本植物根—土复合体直剪试验。本项研究通过野外试验区制取内径为 6.18 cm, 高为 2.00 cm(体积为 60 cm³) 环刀试样, 并在室内进行直接剪切试验, 得到不同边坡土体抗剪强度指标。在制取根—土复合体试样过程中, 分别设立模拟降雨前和降雨后 2 种工况条件, 选择边坡坡顶、坡中、坡底位置对 6 种不同边坡类型进行原位取样, 且每种类型边坡制取 3 组草本根—土复合体重复试样。在制取试样时, 每个取样点位置处分别按照上层和下层 2 层取样的方法进行, 即上层为地表以下 0—10 cm 深度, 下层则为地表以下 10—20 cm 深度。另外, 在试验区原位制取根—土复合体试样的同时, 相应地制取根—土复合体其含水率、密度试样。最后, 在室内开展根—土复合体直剪试验, 得到根—土复合体抗剪强度指标即黏

聚力 c 值(kPa)和内摩擦角 φ 值(°)^[27]。

3 结果与分析

3.1 模拟降雨条件下边坡坡面产流产沙特征

3.1.1 不同草本植物和坡形条件下坡面产流特征

(1) 边坡坡面产流率。图 3 为试验区不同生长期 6 种不同类型边坡坡面产流率随降雨历时变化的关系。由该图可知, 模拟降雨过程中, 区内植物生长期为 1 a, 2 a 的 6 种不同类型边坡, 均表现出直形裸坡坡面产流率相对最大, 而垂穗披碱草阶梯形边坡其产流率相对最小, 分别为 0~0.365 L/min, 0~0.148 L/min。其中, 生长期为 2 a 的阶梯形裸坡与垂穗披碱草阶梯形边坡坡面均在 0~5 min 内未出现产流现象, 生长期为 2 a 的垂穗披碱草阶梯形边坡坡面的最大产流率较阶梯形裸坡降低 93.09%。

试验区不同生长期 6 种不同类型边坡坡面平均产流率的变化趋势见图 4。由该图可知, 相同坡形条件下植物边坡能显著降低坡面平均产流率, 主要表现在直形边坡中, 生长期为 2 a 的种植老芒麦直形边坡平均产流率较直形裸坡降低幅度最大为 73.83%; 阶梯形边坡中, 生长期为 2 a 的垂穗披碱草阶梯形边坡平均产流率较阶梯形裸坡降低幅度为 89.77%。进一步分析可知, 区内阶梯形边坡相对直形边坡能显著降低坡面平均产流率, 表现在生长期为 1 a, 2 a 的垂穗披碱草阶梯形边坡平均产流率分别为垂穗披碱草直形边坡的 3.38 倍、9.22 倍。随着草本生长期增加, 坡面平均产流率均显著降低, 在阶梯形边坡中, 生长期为 2 a 垂穗披碱草阶梯形边坡平均产流率较生长期为 1 a 时的平均产流率降幅为 63.85%。综上所述, 区内种植垂穗披碱草阶梯形边坡可显著降低坡面平均产流率。

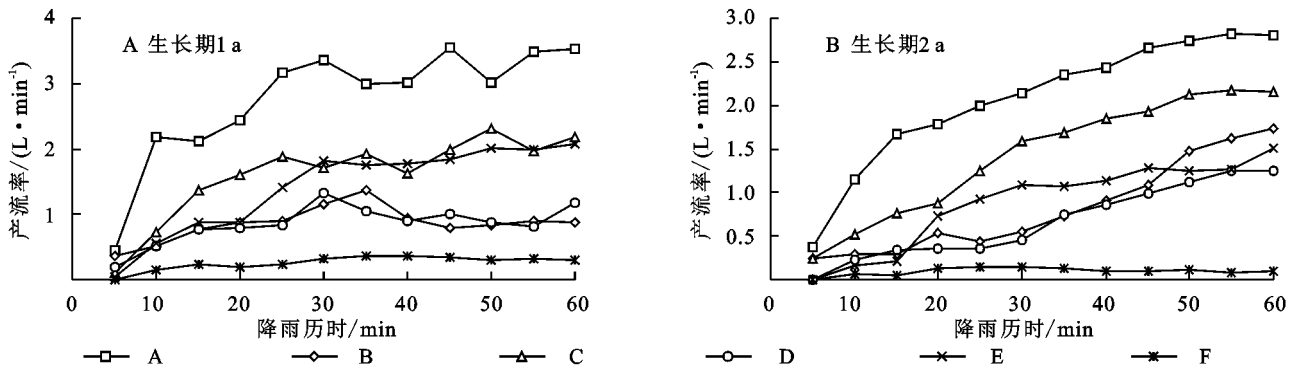


图 3 试验区 6 种不同类型边坡坡面产流率与降雨历时之间关系曲线

(2) 边坡坡面累积径流量。试验区 6 种不同类型边坡坡面累积径流量随降雨历时变化的关系见图 5。由该图可知, 随降雨历时的增加, 区内 6 种不同类型边坡坡面累积径流量均逐渐增加, 且直形裸坡坡面

累积径流量的增长趋势相对较显著, 种植垂穗披碱草阶梯形边坡坡面累积径流量的增长趋势相对较小。

此外, 图 6 为试验区不同生长期 6 种不同类型边坡累积径流量之间的对比关系。由该图可知, 生长期

为1 a的老芒麦直形边坡坡面累积径流量较直形裸坡降低幅度最大为41.58%,生长期为1 a的垂穗披碱草阶梯形边坡累积径流量较阶梯形裸坡降低73.56%,该结果表明区内种植草本边坡能起到有效减小边坡累积径流量的作用。与此同时,生长期为2 a的垂穗披碱草阶梯形边坡坡面累积径流量较垂穗披碱草直形边坡降低68.00%,阶梯形裸坡坡面累积径流量与直形裸坡相比降低59.83%,表明阶梯形边坡类型对坡面累积径流量同样起到抑制作用。与生长期为1 a的累积径流量相比较,生长期2 a的老芒麦直形边坡累积径流量降低幅度最大为65.41%,垂穗披碱草阶梯形边坡降低幅度最小为31.07%。以上结果表明,随着生长期增加,区内6种边坡累积径流量均逐渐降低。

与此同时,窦增宁^[28]、李华坦^[8]等相关研究结果亦表明植物具有抑制地表径流的作用。邵奕铭等^[29]以黄土丘陵沟壑区典型小流域—羊圈沟小流域为研究区,通过观测2015—2016年陕西延安宝塔区降雨产生的产流产沙量,结果表明黄土丘陵区典型的草本

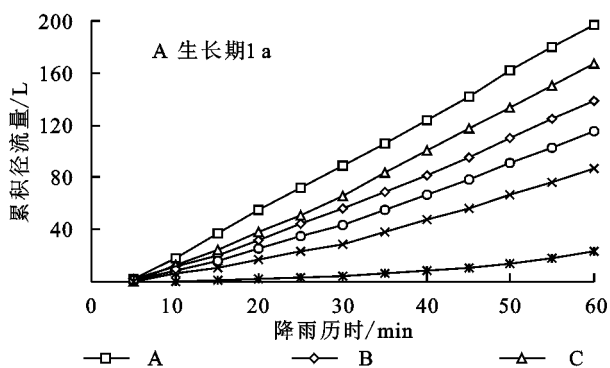


图5 试验区6种不同类型边坡坡面累积径流量与降雨历时之间的关系

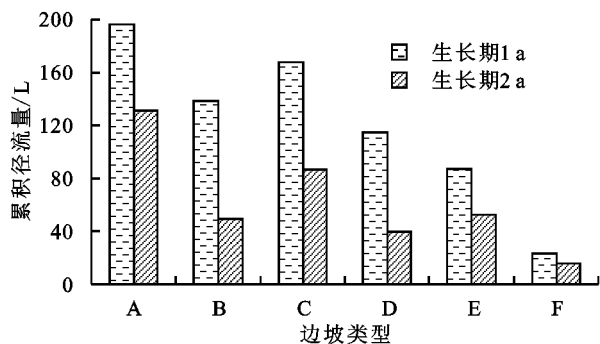
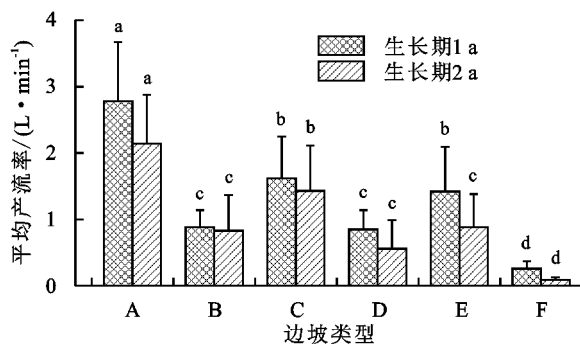


图6 试验区不同生长期6种不同类型边坡累积径流量之间的对比关系

3.1.2 不同草本植物和坡形条件下坡面产沙特征

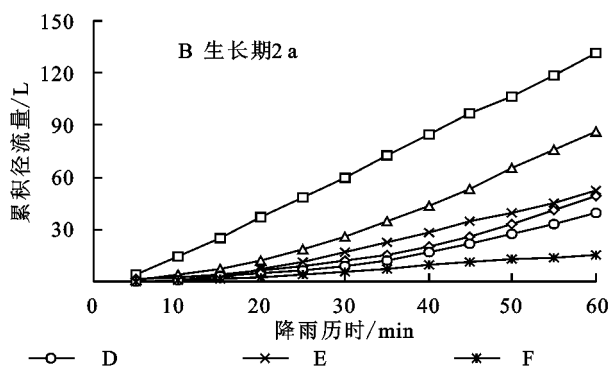
(1) 坡面产沙率。试验区6种不同类型边坡坡面的产沙率随降雨历时之间的变化关系见图7。由该图可知,植物生长期为1 a,2 a的6种不同类型边坡坡面产沙率均随着降雨历时的增加,表现出呈先增大后趋于稳定的变化规律。与其他5种类型边坡相比较,生长期

须芒草(*Andropogon yunnanensis*)、半灌木铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)和灌木绣线菊(*Spiraea pubescens*)3种植物均具有良好的减流作用,与未种植裸地相比较,自然状态下灌木绣线菊对抑制坡面产流量的作用最大,减流率为73.1%。上述研究结果与本研究结果基本相一致。



注:(1) 平均产流率为12个时间段内边坡产流率的平均值;(2) 不同小写字母表示生长期相同,不同植物边坡间的平均产流率有显著性差异($p < 0.05$)。

图4 试验区不同生长期6种不同类型边坡平均产流率对比关系



为1 a,2 a的直形裸坡坡面产沙率较植物边坡的产沙率大,坡面产沙率分别为10~52 g/min,4.4~24.4 g/min,垂穗披碱草阶梯形边坡的产沙率最小,坡面产沙率分别为0~2 g/min,0~1.4 g/min。

试验区不同生长期的6种不同类型边坡平均产沙率之间的关系见图8。由该图可知,随着生长期增加,6种不同类型边坡平均产沙率均逐渐降低,具体表现为在直形边坡中,生长期为2 a的种植细茎冰草直形边坡平均产沙率较生长期为1 a时降低幅度最大为83.72%,垂穗披碱草阶梯形边坡次之为65.57%;相同坡形条件下植物边坡能显著降低坡面平均产沙率,在直形边坡中,生长期为1 a的老芒麦直形边坡平均产沙率较直形裸坡降低幅度最大为91.22%,垂穗披碱草直形边坡次之为89.91%;阶梯形边坡中,生长期为1 a的垂穗披碱草阶梯形边坡平均产沙率较阶梯形裸坡降低幅度最大为86.27%。阶梯形边坡相对直形边坡能显

著降低坡面平均产沙率,生长期为 2 a 的垂穗披碱草阶梯形边坡平均产沙率较垂穗披碱草直形边坡降低

80.13%。综上所述,区内种植垂穗披碱草阶梯形边坡可显著降低坡面平均产沙率。

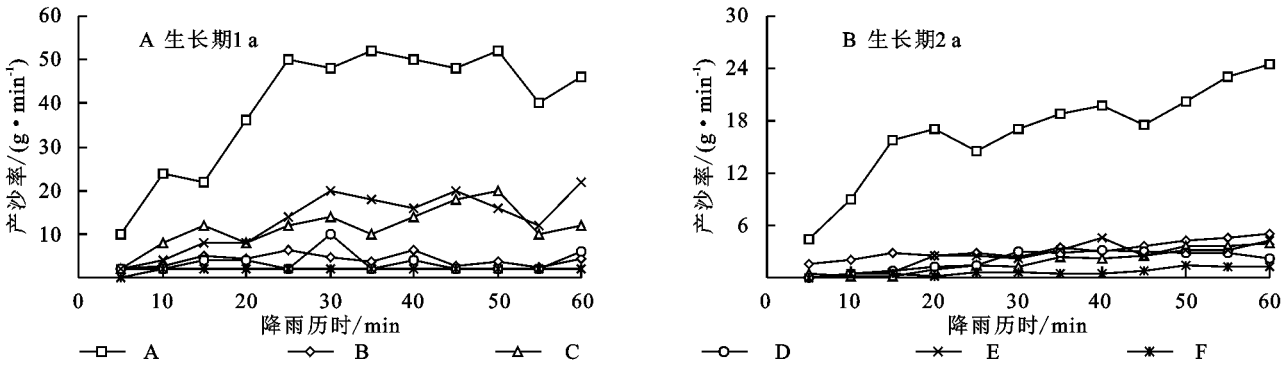
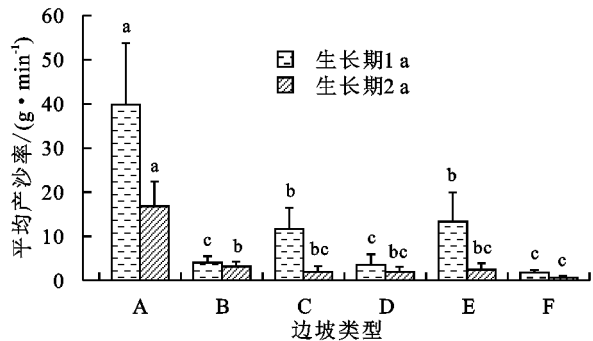


图 7 试验区 6 种不同类型边坡产沙率与降雨历时之间的关系



注:(1) 平均产沙率为 12 个时间段内边坡产沙率的平均值;(2) 不同小写字母表示生长期相同时,不同植物边坡之间的平均产沙率存在显著性差异($p<0.05$)。

图 8 试验区不同生长期 6 种不同类型边坡平均产沙率之间的对比关系

(2) 坡面累积产沙量。试验区 6 种不同类型边坡坡面累积产沙量随降雨历时的变化曲线见图 9。由该图可知,随降雨历时的增加,区内 6 种不同类型边坡坡面累积产沙量的变化趋势与累积径流量表现出相一致的特征。

试验区不同生长期 6 种不同类型边坡累积产沙量

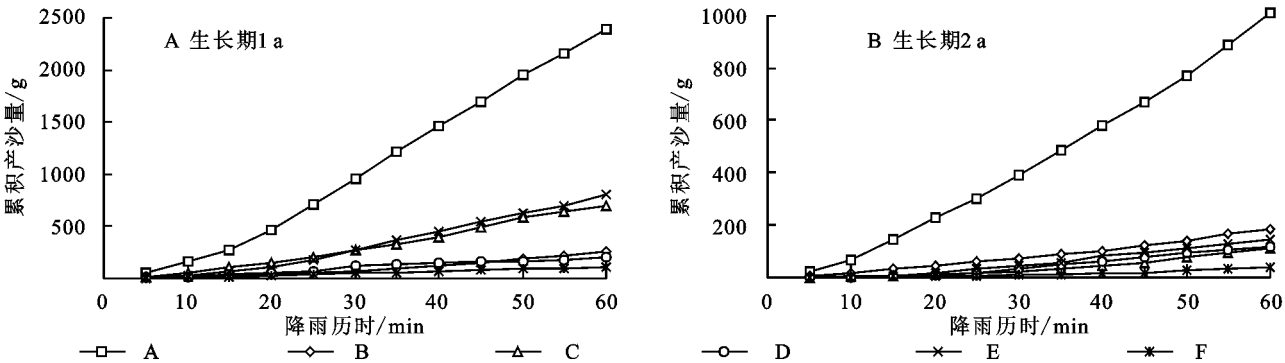


图 9 试验区 6 种不同类型边坡坡面累积产沙量与降雨历时之间的关系

3.2 模拟降雨入渗条件下植被边坡土体密度、含水率及其特征

如表 1 和表 2 所示为试验区模拟降雨前后边坡土体密度、含水率试验结果。由该表可知,模拟降雨

之间的对比关系见图 10。由该图可知,种植草本植物边坡对产沙的抑制作用较为明显,表现在生长期为 2 a 的直形裸坡坡面累积产沙量为 1 008 g,分别为相同生长期垂穗披碱草、细茎冰草、老芒麦直形边坡的 5.42,8.84,8.54倍;相应地,在阶梯形边坡中,生长期为 1 a 的垂穗披碱草阶梯形边坡坡面累积产沙量较阶梯形裸坡降低幅度为 87.50%。6 种边坡累积产沙量随着生长期增加呈降低的趋势,与生长期为 1 a 的边坡相比较,生长期为 2 a 的垂穗披碱草直形边坡坡面累积产沙量降幅为 28.07%,阶梯形边坡降幅为 65.45%。进一步分析得到,生长期为 2 a 的种植垂穗披碱草阶梯形边坡坡面累积产沙量较直形边坡降幅为 79.68%。

综上所述,区内 3 种优势草本均具有良好的保水固土效应,其中垂穗披碱草与老芒麦抑制产流产沙效果相对较为显著;在 2 种边坡坡形中,阶梯形边坡能更有效抑制坡面水土流失;且随着植物生长期的增加,种植垂穗披碱草阶梯形边坡总体降低产流产沙效果较为显著。因此,区内种植垂穗披碱草阶梯形边坡对有效抑制边坡坡面水土流失作用相对较为显著。

前,在直形边坡中,植物边坡上层(0—10 cm)和下层(10—20 cm)含水率均高于裸坡,模拟降雨后,6 种类型边坡上层的含水率增加相对较明显,而下层土体含水率增加趋势则相对缓慢,其中,种植垂穗披碱草直

形边坡与阶梯形边坡其上层土体含水率较降雨前增幅最大,分别为 67.00%,63.32%。此外,模拟降雨前 6 种不同类型边坡,均表现出下层土体其平均密度大于上层,其中阶梯形裸坡的平均密度大于阶梯形种植垂穗披碱草边坡。模拟降雨后,6 种不同类型边坡上层和下层土体平均密度较降雨前均表现出不同程度的增长,种植垂穗披碱草阶梯形边坡上层和下层增幅均较大,分别为 19.08%,20.26%,垂穗披碱草直形边坡次之,分别为 18.92%,16.05%。

综上所述,通过对比区内边坡上层(0—10 cm)、下层(10—20 cm)土体其密度与含水率可知,在相同深度位置处,在模拟降雨前后,植物边坡平均含水率均大于裸坡,且随深度增加而降低,其中垂穗披碱草直形边坡与阶梯形边坡的平均含水率在降雨后增幅最大;同时,模拟降雨前未种植裸坡的平均密度均大于植物边坡,其平均密度随深度增加呈增大的变化规律,在降雨模拟试验后,种植草本边坡其平均密度大于裸坡。产生上述现

象的主要原因在于,植物根系较为发达,根系在植物生长过程中表现出涵养土壤水分的功能^[30]。此外,李同录等^[31]对黄土地区自然降雨条件下开展现场监测结果表明,黄土区日降雨量大于 25 mm/d 或日累积降雨量超过 25 mm 时,土壤含水率在 1.0 m 内的土层中增加明显,但随深度增加含水率增加幅度显著变小。上述研究结果与本项研究结果基本相一致。

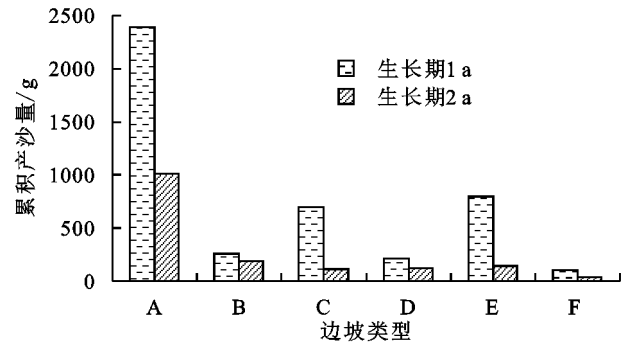


图 10 试验区不同生长期 6 种不同类型边坡累积产沙量之间的对比关系

表 1 试验区 6 种类型边坡模拟降雨前边坡土体物理性质指标试验测试结果

边坡类型		平均含水率/%		平均密度/(g·cm ⁻³)	
		上层	下层	上层	下层
直形边坡	未种植裸坡	14.97±2.01 ^b	14.57±1.96 ^a	1.55±0.10 ^b	1.57±0.09 ^{bc}
	垂穗披碱草边坡	17.94±1.68 ^a	16.92±2.35 ^a	1.53±0.07 ^b	1.62±0.05 ^b
	细茎冰草边坡	16.04±1.31 ^b	15.30±1.31 ^a	1.55±0.15 ^b	1.56±0.09 ^{bc}
	老芒麦边坡	17.62±1.07 ^a	17.31±1.33 ^a	1.65±0.11 ^a	1.73±0.08 ^a
阶梯形边坡	未种植裸坡	13.42±0.88 ^c	14.21±2.46 ^a	1.55±0.09 ^{ab}	1.65±0.08 ^b
	垂穗披碱草边坡	12.76±1.15 ^c	12.66±0.91 ^b	1.52±0.08 ^b	1.53±0.06 ^c

注:(1)表中上层指边坡坡面以下 0—10 cm 处,下层指边坡坡面以下 10—20 cm 处;(2) 同列不同字母表示,不同植物边坡间有显著性差异($p<0.05$)。下同。

表 2 试验区 6 种类型边坡模拟降雨后边坡土体物理性质指标试验测试结果

边坡类型		平均含水率/%		平均密度/(g·cm ⁻³)	
		上层	下层	上层	下层
直形边坡	未种植裸坡	20.72±2.64 ^b	19.00±1.75 ^b	1.80±0.06 ^b	1.82±0.14 ^b
	垂穗披碱草边坡	23.26±1.35 ^a	22.72±1.68 ^a	1.82±0.09 ^a	1.88±0.12 ^{ab}
	细茎冰草边坡	25.29±0.46 ^a	22.88±2.69 ^a	1.73±0.46 ^c	1.90±0.09 ^a
	老芒麦边坡	24.12±1.50 ^a	21.88±2.14 ^a	1.80±0.15 ^b	1.82±0.12 ^{ab}
阶梯形边坡	未种植裸坡	19.31±1.43 ^b	17.65±2.11 ^b	1.76±0.13 ^c	1.80±0.09 ^b
	垂穗披碱草边坡	20.84±1.34 ^b	20.40±1.79 ^{ab}	1.81±0.07 ^b	1.84±0.11 ^{ab}

3.3 模拟降雨入渗对植物边坡根—土复合体抗剪强度的影响

试验区 6 种类型边坡模拟降雨前根—土复合体抗剪强度试验结果见表 3。由该表可知,区内 6 种不同类型边坡中,植物边坡表层黏聚力 c 值显著大于未种植裸坡。在直形边坡中,种植垂穗披碱草边坡其黏聚力 c 值最大,为 18.63 kPa,老芒麦边坡次之;与未种植直形裸坡相比较,种植垂穗披碱草边坡的黏聚力 c 值增加幅度最大为 141.95%;在阶梯形边坡中,种植垂穗披碱草边坡较裸坡其黏聚力 c 值增幅为

38.49%。进一步分析表明,随着取样深度增加,上层土体(0—10 cm)黏聚力 c 值大于下层(10—20 cm),直形边坡中的未种植裸坡、垂穗披碱草边坡、细茎冰草边坡、老芒麦边坡其下层土体黏聚力 c 值较上层分别降低 40.26%,47.72%,40.06%,48.64%,阶梯形边坡中裸坡、垂穗披碱草边坡其下层土体(10—20 cm)黏聚力 c 值较上层分别降低 35.27%,30.36%。上述研究表明,种植草本植物对区内直形和阶梯形边坡土体黏聚力 c 值的增强作用相对较大。

由表 4 可知,在模拟降雨试验后,区内 6 种不同类

型边坡中,植物边坡表层黏聚力 c 值较模拟降雨前均呈显著下降趋势,在直形边坡中,种植垂穗披碱草边坡、老芒麦边坡降雨后其上层根—土复合体的黏聚力 c 值较降雨前降低幅度分别为 34.19%,37.24%。未种植阶梯形裸坡、垂穗披碱草阶梯形边坡模拟降雨后上层根—土复合体黏聚力 c 值较降雨前分别降低 17.20%,19.25%,表明阶梯形边坡其黏聚力 c 值降低幅度较直形边坡小。此外,种植垂穗披碱草的直形边坡与阶梯形边坡其上层土体含水率较降雨前增幅最大,分别为 67.00%,63.32%,而其黏聚力 c 值降低幅度分别为 34.19%,19.25%,表明与直形边坡相比较,阶梯形边坡具有减缓降雨所造成的边坡土体黏聚力 c 值降低的作用。

产生上述结果的主要原因在于,区内降雨使得边坡浅层土体含水率增加,孔隙水压力增大,降低了边坡土体的抗剪强度^[32],从而降低了边坡稳定性。相关研究结果表现为,李华坦等^[33]以青藏高原东北部黄土区西宁盆地作为试验区,通过对柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)等 4 种灌木采用单一种植试验,以及柠条锦鸡儿分别与细茎冰草(*Agropyron trachycaulum*)、垂穗披碱草

(*Elymus nutans*)组合种植,开展原位模拟降雨和直剪试验,结果表明模拟降雨试验后未种植裸坡和植物边坡表层黏聚力呈显著下降。该研究结果与本项研究所得到的结果基本一致。此外,试验区 6 种不同类型边坡在模拟降雨前后,坡面根—土复合体内摩擦角 φ 值均未表现出规律性变化。

综上所述,本项研究中由模拟降雨试验结果表明,植物边坡在降雨过程中能起到较好的抑制坡面产流产沙作用,区内 6 种边坡类型中以阶梯形垂穗披碱草边坡效果相对最为显著,且随着植物生长期增加,其效果愈为显著;由直剪试验结果可知,区内模拟降雨试验后土体含水率增大,边坡土体黏聚力降低,而阶梯形边坡其黏聚力降低幅度较直形边坡相对较小,表明阶梯形边坡能有效减缓含水率增大造成的土体黏聚力降低,进而起到有效防治由降雨引起边坡浅层失稳的作用。因此,结合模拟降雨试验和直剪试验结果,本项研究的 6 种不同类型边坡中,阶梯形垂穗披碱草边坡具有相对较为显著的抑制产流产沙和增强边坡土体抗剪强度的作用,进而有效提高其边坡浅层稳定性。

表 3 试验区 6 种类型边坡模拟降雨试验前边坡土体和根—土复合体抗剪强度指标试验结果

边坡类型		平均黏聚力 c 值/kPa		平均内摩擦角 φ 值/(°)	
		上层	下层	上层	下层
直形边坡	未种植裸坡	7.70±1.30 ^b	4.60±1.54 ^b	23.23±1.27	24.20±1.08
	垂穗披碱草边坡	18.63±12.29 ^a	9.74±1.83 ^{ab}	20.20±1.90	22.36±1.13
	细茎冰草边坡	12.43±9.61 ^{ab}	7.45±4.19 ^b	22.55±2.68	19.65±7.07
	老芒麦边坡	13.24±3.44 ^{ab}	4.80±3.40 ^b	19.45±1.06	20.13±2.26
阶梯形边坡	未种植裸坡	9.30±2.42 ^{ab}	6.02±3.92 ^b	26.95±0.68	27.30±2.63
	垂穗披碱草边坡	12.88±4.90 ^{ab}	8.97±3.81 ^{ab}	25.46±4.43	21.60±1.35

表 4 试验区 6 种类型边坡模拟降雨试验后边坡土体和根—土复合体抗剪强度指标试验结果

边坡类型		平均黏聚力 c 值/kPa		平均内摩擦角 φ 值/(°)	
		上层	下层	上层	下层
直形边坡	未种植裸坡	6.30±1.28 ^{abc}	3.33±2.11 ^c	20.40±0.95	22.87±2.71
	垂穗披碱草边坡	12.26±8.86 ^a	6.05±0.65 ^{abc}	21.52±0.26	22.88±3.15
	细茎冰草边坡	10.70±0.70 ^{ab}	5.95±0.95 ^{abc}	22.20±2.69	23.80±2.55
	老芒麦边坡	8.31±5.16 ^{abc}	3.19±1.85 ^c	22.91±1.93	22.68±1.98
阶梯形边坡	未种植裸坡	7.70±3.89 ^{abc}	4.98±2.24 ^{bc}	21.17±3.94	23.37±1.94
	垂穗披碱草边坡	10.40±2.48 ^{abc}	7.56±4.80 ^{abc}	22.15±5.01	25.65±1.24

4 结 论

(1) 区内阶梯形边坡相对直形边坡能显著降低坡面产流产沙,种植草本植物能显著抑制坡面产流产沙,且随着草本生长期增加,坡面产流产沙均呈显著降低趋势,其中生长期为 2 a 的种植垂穗披碱草阶梯形边坡累积产沙量较生长期 1 a 降幅为 65.45%,平均产沙率较垂穗披碱草直形边坡降低 80.13%。

(2) 模拟降雨试验后,区内 6 种不同植物边坡其土体含水率均显著增大,而植物边坡表层土体黏聚力

c 值显著降低,其中垂穗披碱草阶梯形边坡上层根—土复合体黏聚力 c 值较降雨前降低幅度为 19.25%。

(3) 根据 6 种不同植物边坡人工模拟降雨和根—土复合体直剪试验可知,区内种植垂穗披碱草阶梯形边坡相对于其他 5 种不同植物边坡类型,可起到相对更为显著的有效抑制边坡坡面水土流失和增强边坡浅层土体抗剪强度,进而提高边坡浅层稳定性的作用。

参考文献:

[1] 彭建兵,王启耀,门玉明,等.黄土高原滑坡灾害[M].北京:科学出版社,2019.

- [2] Zhuang J Q, Peng J B, Wang G H, et al. Distribution and characteristics of landslide in Loess Plateau: A case study in Shaanxi Province [J]. Engineering Geology, 2018, 236: 89-96.
- [3] Feng J, Wei W, Pan D I. Effects of rainfall and terracing-vegetation combinations on water erosion in a loess hilly area, China [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 261: 110247.
- [4] 饶鸿,王金淑,赵志明,等.基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析[J].水文地质工程地质, 2021, 48(1): 154-162.
- [5] Tao H, Zhang M M, Gong L, et al. The mechanism of slope instability due to rainfall-induced structural decay of earthquake-damaged loess [J]. Earthquake Research Advances, 2022, 2(3): 100137.
- [6] 李国荣,陈文婷,朱海丽,等.青藏高原东北部黄土地区降雨入渗对土质边坡稳定性的影响研究[J].水文地质工程地质, 2015, 42(2): 105-111.
- [7] 栗岳洲,付江涛,胡夏嵩,等.土体粒径对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 403-412.
- [8] 李华坦,赵玉娇,李国荣,等.寒旱环境黄土区植物护坡原位模拟降雨试验研究[J].水土保持研究, 2014, 21(6): 304-311.
- [9] 谢申琦,高丽倩,赵允格,等.模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应[J].应用生态学报, 2019, 30(2): 391-397.
- [10] Xia L, Song X Y, Fu N, et al. Effects of forest litter cover on hydrological response of hillslopes in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2019, 181: 104076.
- [11] 李智勇,张梦杰,陈明玉,等.苜蓿对坡面产流产沙及土壤水分的影响[J].水土保持研究, 2021, 28(5): 54-60.
- [12] 侯宁,王勇,赵虎,等.耕作侵蚀对不同坡度下紫色土侵蚀产沙的影响[J].山地学报, 2021, 39(4): 495-505.
- [13] Sun P, Wang H J, Wang G, et al. Field model experiments and numerical analysis of rainfall-induced shallow loess landslides [J]. Engineering Geology, 2021, 295: 106411.
- [14] Huang M Y, Sun S J, Feng K J, et al. Effects of *Neyraudia reynaudiana* roots on the soil shear strength of collapsing wall in Benggang, southeast China [J]. Catena, 2022, 210: 105883.
- [15] Xu H, Wang X Y, Liu C N, et al. A 3D root system morphological and mechanical model based on L-Systems and its application to estimate the shear strength of root-soil composites [J]. Soil & Tillage Research, 2021, 212: 105074.
- [16] 唐凛,杨晓松,查旭东,等.基于含水率的重塑低液限黏土抗剪强度关系模型试验[J].长沙理工大学学报:自然科学版, 2021, 18(2): 26-32.
- [17] 林斌,田竹华,陈雨漫.含水率对重塑红黏土反复抗剪强度影响试验研究[J].黄金科学技术, 2021, 29(5): 680-689.
- [18] 李佳,汪霞,贾海霞,等.浅层滑坡多发区典型灌木根系对边坡土体抗剪强度的影响[J].生态学报, 2019, 39(14): 5117-5126.
- [19] 刘亚斌,胡夏嵩,余冬梅,等.西宁盆地黄土区草本和灌木组合根系分布特征及其增强土体抗剪强度效应[J].工程地质学报, 2020, 28(3): 471-481.
- [20] 何永晴,李凤霞.近 47 年环青海湖地区气候变化特征分析[J].安徽农业科学, 2011, 39(16): 9902-9904.
- [21] 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.
- [22] 许桐,刘昌义,胡夏嵩,等.西宁盆地黄土区荷载条件下植被护坡力学效应[J].农业工程学报, 2021, 37(2): 142-151.
- [23] 孙红丽,王贵玲,蔺文静.西宁盆地地下热水的 TDS 分布特征及富集机理[J].地质科技通报, 2022, 41(1): 278-287, 299.
- [24] 胡夏嵩,毛小青,朱海丽,等.青藏高原植被护坡[M].北京:地质出版社, 2011.
- [25] 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.
- [26] 孙若修,申明爽,胡亚伟,等.模拟降雨下坡面草带分布对产流产沙过程的影响[J].水土保持学报, 2022, 36(4): 22-29.
- [27] 许桐,刘昌义,胡夏嵩,等.柴达木盆地 4 种盐生植物根系力学特性及根—土复合体抗剪强度研究[J].水土保持研究, 2021, 28(3): 101-110.
- [28] 窦增宁,胡夏嵩,刘昌义,等.模拟降雨条件下黄土区边坡植物护坡效应[J].人民黄河, 2018, 40(3): 83-87.
- [29] 邵奕铭,高光耀,刘见波,等.自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应[J].生态学报, 2022, 42(1): 322-331.
- [30] 申紫雁,刘昌义,胡夏嵩,等.黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J].干旱区研究, 2021, 38(2): 392-401.
- [31] 李同录,习羽,侯晓坤.水致黄土深层滑坡灾变机理[J].工程地质学报, 2018, 26(5): 1113-1120.
- [32] 赵吉坤,陈佳虹.降雨条件下土体坡度及含水率对边坡稳定性影响的试验研究[J].山东大学学报:工学版, 2013, 43(2): 76-83.
- [33] 李华坦,李国荣,赵玉娇,等.模拟自然降雨条件下植物根系增强边坡土体抗剪强度特征[J].农业工程学报, 2016, 32(4): 142-149.