

不同植被盖度对三峡库区边坡减蚀的室内模拟降雨研究

王瑞红, 李明鑫, 张 瀚, 王 芳, 张健锋, 贾敬茹, 危 灿

(三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为探究气候和植被覆盖度变化对三峡库区消落带库岸边坡的影响, 通过开展人工模拟降雨试验, 分析不同雨强和植被覆盖度(0, 30%, 50%, 70%, 90%)下坡面侵蚀规律及变化特征。结果表明: (1) 在不同雨强下, 植被边坡侵蚀累计产沙量均随植被覆盖度的增加呈现下降趋势, 整体下降演变的趋势可分为迅猛—平缓—稳定 3 个阶段, 三峡库区消落带库岸边坡的临界盖度为 50%~70%, 维持植被覆盖度在此区间可以有效抑制坡面的泥沙损失。(2) 同一植被覆盖度条件下地表径流相对系数与雨强呈正相关。同一雨强条件下地表径流相对系数与植被覆盖度呈负相关, 说明坡面植被可以有效地阻滞地表径流, 对水土流失具有一定的抑制作用。(3) 选用 Horton 降雨入渗模型分析不同植被覆盖度对降雨入渗速率影响, 发现不同植被覆盖下边坡降雨入渗大体分为降雨初期迅速减小, 中期减小幅度变缓, 后期逐渐趋于稳定 3 个阶段。植被覆盖度越大, 稳定入渗率越高。研究成果可为三峡库区库岸边坡水土流失治理与推动长江生态环境保护修复提供理论参考。

关键词: 三峡库区消落带; 雨强; 植被覆盖度; 坡面侵蚀; 人工模拟降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)01-0059-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.009

Study on Indoor Simulated Rainfall with Different Vegetation Coverage on Slope Erosion Reduction in the Three Gorges Reservoir Area

WANG Ruihong, LI Mingxin, ZHANG Han, WANG Fang, ZHANG Jianfeng, JIA Jingru, WEI Can

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area,

Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002)

Abstract: In order to explore the influence of climate and vegetation coverage changes on the shore slope of the fading zone of the Three Gorges reservoir area, the erosion laws and changing characteristics of different rainfall intensity and the vegetation coverage (0, 30%, 50%, 70%, 90%) were analyzed with artificial simulated rainfall experiments. The results show that: (1) Under different rain intensities, the accumulated sediment yield of vegetation slope erosion shows a downward trend with the increase of vegetation coverage, and the overall downward evolution trend can be divided into three stages rapid-gentle-stable, and the critical coverage of the shore slope of the Three Gorges Reservoir Area in the fading zone is 50%~70%, and maintaining vegetation coverage in this interval can effectively inhibit the sediment loss on the slope. (2) The relative coefficient of surface runoff under the same vegetation cover is positively correlated with rain intensity. The relative coefficient of surface runoff under the same rain intensity is negatively correlated with the vegetation coverage. It indicates that the vegetation on the slope can effectively block the surface runoff and have a certain inhibitory effect on soil erosion. (3) The Horton rainfall infiltration model was selected to analyze the influence of different vegetation coverage on the infiltration rate of rainfall. The analysis suggests that the infiltration of rainfall on the slopes under different vegetation cover was roughly divided into three stages rapid decrease in the early stage of rainfall, slowing down in the midterm, and gradual stabilization in the later stage. The greater the vegetation coverage, the higher the stable penetration rate. The research results can provide a theoretical reference for soil erosion control on the slopes of the Three Gorges Reservoir Area and for promoting the protection and restoration of the ecological environment of the Yangtze River.

收稿日期: 2022-09-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(51979151); 长江水利委员会长江科学院开放基金项目(CKWV2018469/KY); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放基金项目(2020KDZ07)

第一作者: 王瑞红(1981—), 女, 博士, 教授, 主要从事边坡岩体开挖卸荷力学特性教学与研究。E-mail: wrh@ctgu.edu.cn

通信作者: 危灿(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事防灾减灾工程研究。E-mail: wc344053183@163.com

Keywords: fluctuation zone of Three Gorges Reservoir Area; rain intensity; vegetation coverage; slope erosion; artificial rainfall simulation

三峡库区属于中亚热带湿润季风气候,其生态环境脆弱,水土流失严重^[1-3],夏季长、冬季短,夏日天数最高长达 180 天,降雨具有季节性变化,且主要集中在夏季,持续有雨日数最高可达半月,由于库区内地势起伏较大,强降雨诱发库岸边坡植被破坏、水土流失滑坡崩塌等灾害屡见不鲜^[4-6],威胁到水库的正常运行与水库生态系统的可持续性发展,对人民的生命财产造成极大的危害。因此,研究在降雨条件下三峡库区库岸边坡的减蚀性能对三峡库区库岸边坡的稳定性具有重要意义。

已有研究^[7-8]表明,降雨强度是诱发边坡失稳的关键因素,也是引起土壤侵蚀的主要影响因子,雨强的增大提高坡面径流量和侵蚀量^[9]。为了防止边坡发生失稳破坏,减少水土流失,长期以来的科学研究和工程实践证明,植被在防治水土流失方面起到最积极的因素。植被对坡面径流有良好的抑制作用,植被的存在可削弱雨滴降落的动能,减少由降雨所产生径流而带走土颗粒^[10-11]。植物的根系与土壤的相互作用提高坡面对土体的抗剪强度^[12-13],增强土壤的抗侵蚀能力,改善土壤结构,增加土壤入渗^[14-16]。植被护坡在改善生态环境、减少水土流失、涵养水源、固土护坡等方面有着不可替代的作用,陈洪松等^[17]研究表明,提高植被的覆盖度可以明显延迟土壤的产流,进而提高土壤的水分入渗,并在一定程度上促进土壤水分向深层土体运移;吴希媛等^[18]认为,降雨强度是影响径流和入渗的决定因素,植被覆盖度与降雨强度两者之间形成交互性影响;Marston^[19]研究表明,在坡面植被覆盖度超过 65% 的情况下,根系对土壤孔隙发生显著的变化,对降水期间的入渗产生一定的影响。随着生态文明建设的发展,基于植物的生态护坡技术已成为当今护坡工程中的一个热点和发展方向。

目前围绕雨强和植被覆盖度的研究主要集中在黄土边坡和紫土边坡,针对三峡库区消落带库岸边坡的雨强和植被覆盖度综合研究方面成果较少。而且三峡库区具有湿度高的环境特点,防冲刷能力相对较低,所以库岸边坡抗侵蚀影响也有别与其他边坡。基于此,本文采用自制试验装置,开展不同雨强和不同植被覆盖度综合作用下人工降雨模拟试验,旨在进一步揭示雨强和植被覆盖度对三峡库区消落带库岸边坡的侵蚀规律及变化特征,为三峡库区消落带滑坡区域内退化生态系统的修复治理和人工植被构建提供理论依据和参考,进而为工程实践服务。

1 材料与方法

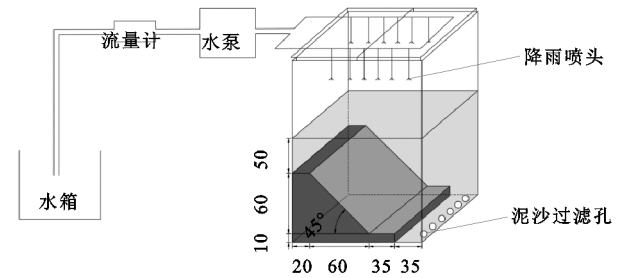
1.1 供试材料

试验于 2021 年 4 月 16 日在三峡大学实验大楼进行,试验土样取自三峡库区太平溪镇典型库岸堆积体边坡消落带土体(110°51′—111°03′E,30°57′—30°49′N),该区域位于夷陵区西部,长江北岸,三峡工程左岸,为坝区库首第一镇。冬季蓄水 175 m,夏季则腾库至 145 m,腾库后有 30 m 的消落带用于防御洪水,在低水位时存在大量的黄土裸露层,为典型的生态脆弱区,每年周期性的水位涨落使该区的水土流失更加严重。另外,由于水库消落带裸露期恰逢夏季,降雨集中且阳光充足,使该区域更加容易遭受降雨侵蚀和径流冲刷的危害。现场原状土取土后进行 5 项土工试验:土的天然密度试验、含水率试验、比重试验、根系复合土直剪试验及颗粒筛分试验。得出原状土的天然密度为 2.01 g/cm³,平均含水率为 11.87%,土粒比重为 2.63,内摩擦角(φ)为 32.98°,黏聚力(c)为 18.12 kPa,粒径为 5~10,2~5,1~2,0.5~1,0.25~0.5,0.075~0.25,<0.075 mm 的颗粒占比分别为 13.80%,31.18%,26.48%,14.63%,7.73%,4.68%,1.50%。

三峡库区具有独特的环境条件,相比其他区域湿度较高,库岸年平均相对湿度变化范围为 70%~82%。在这种高湿度的环境下,植物类型主要是以草本植物为主。通过对三峡库区太平溪镇库岸边坡植物种群调查,研究区域内共发现狗牙根、狗尾草、马唐、苍耳、鬼针草 5 种植物,其中狗牙根、狗尾草、马唐为禾本科植物,且狗牙根数量最为丰富,分布广泛;其次是苍耳、鬼针草属于菊科植物,分布较少。因此本试验用草选用三峡库区具有代表性的典型优势护坡草本植物狗牙根。该草属于暖季型草植,是喜光照的多年生禾本科草本植物,植株耐高温、经踩踏、四季常青、生长力旺盛、耐干湿环境。不仅具有很强的耐淹和生长恢复能力,也具有很强的拓殖能力,是我国南方较为常见的固土护坡植被。作为须根系植株,其须根细短但结实,通常分布在土体浅表层 40 cm 深度的区域,其繁育范围主要集中在库岸两旁、荒山坡表以及村庄附近,分布范围广袤,在水土保持方面发挥出十分优良的特性。狗牙根生命力顽强,根系发达,其地上茎叶能够减弱雨滴溅蚀,抑制径流冲刷,地下根系增加土体的抗剪强度,在稳定自然环境对坡体浅表层土体造成影响的方面发挥出较大的作用,能有效改善浅表层土体的物理力学特性,具有良好的固土作用^[20],可以作为库岸边坡恢复和重建的主要物种。

1.2 试验装置

本试验采用自制试验装置开展人工模拟降雨试验,实体模型见图 1。模型尺寸为 1.5 m×1 m×1.2 m(长×宽×深),其降雨装置采用雾化喷头降雨,由于降雨时雾化喷头有少量水分溢出,故设置挡水雨帘,试验前进行多次喷头组合及降雨测试,选最优组合,经计算降雨系统的降雨均匀度可达到 81%以上。降雨试验进行前,首先向水箱注入定量的水,然后将 PVC 管一端伸入水中,另一端连接水泵,由水泵提供动力该系统采取分流式管网结构,水泵供水,流量计定量控制,将水依次经 PVC 管、流量计、水泵、分流管,流入降雨装置。通过流量计可获取实时的累计流量及瞬时流量数据,通过调节帽盖圈数可控制流量大小,底部留有 6 个小孔,孔下放置雨水回收槽。模型箱前侧整面和右侧下方用钢化玻璃制成,前侧玻璃上画有长为 4 cm 的方格,便于观察试验过程中边坡土体的破坏过程和降雨过程中入渗规律。



注:图中长度单位为 cm。下同。
图 1 实体模型

1.3 试验方法

试验前,先参照土工试验测定原状土的颗粒级配,将重塑土填于模型箱,填土前根据土的密度和土层厚度来计算填土量。填土过程中喷洒水分进行搅拌,使土的含水量分布均匀,保持所配土体含水率接近原状土的天然含水率,然后采用分层击实填筑的方法,分 7 层填土并压实,每层厚度 10 cm,在每层填土的交界面上人工用木质夯锤均匀击实土体,并随填土过程埋设 MS-10 土壤水分(温度)传感器(8 个水分传感器,从坡顶同一位置向下分别隔 10,30,50 cm 设置),传感器位置布置见图 2。传感器利用 FDR(frequency domain reflectometry)测量原理,该原理利用电磁脉冲在介质中传播频率来测定土壤的表观介电常数,可以有效、快速、稳定地测量各种土壤的含水率及温度。最后按照侧面玻璃上标注的削坡位置进行削坡。

为尽可能模拟真实的降雨条件,整理收集三峡库区相关气象资料^[21]发现,89%的强降雨日面雨量集中在 50 mm 以下,其中 20~29.9 mm 占 51.4%,30~49.9 mm 占 37.6%;50 mm 以上的降雨仅占

10%,夏季时段偶会发生 90 mm 以上强降雨。三峡库区多年平均月降雨量演变规律和强降雨频次分布见图 3。三峡库区 5—9 月为降雨的频发期,强降雨频次达全年强降雨频次的 81%。气象部门根据日降雨量大小划分不同降雨等级见表 1。因此,本试验日降雨量的选定是根据三峡库区近 30 年的降雨资料和研究区域内发生频率最高的降雨量(30,50,90 mm)和降雨强度(15,30,50 mm/h)来模拟实际情况中的中雨、大雨以及暴雨工况。

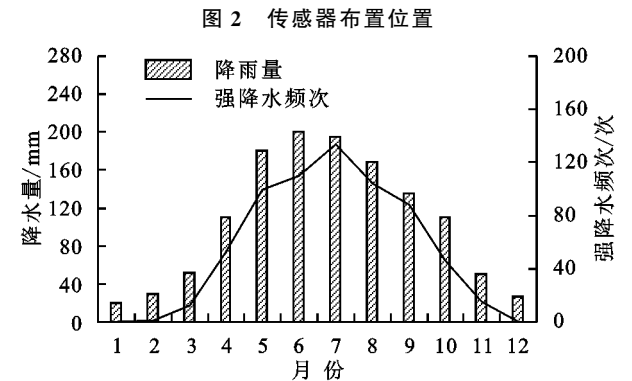
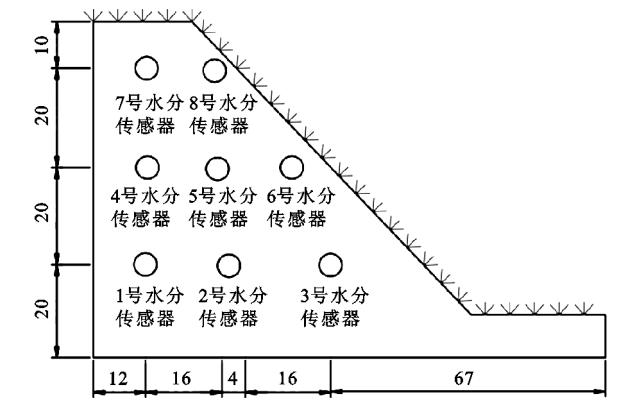


图 3 三峡库区 1980—2016 年平均月降雨量和强降雨频次
表 1 降雨等级统计

降雨等级	日降雨量/mm
小雨	0.1~9.9
小雨—中雨	5.0~16.9
中雨	10.0~24.9
中雨—大雨	17.0~37.9
大雨	25.0~49.9
大雨—暴雨	38.0~74.9
暴雨	50.0~99.9

试验填筑完成后,将种植一定周期的狗牙根移植至边坡表面,采用样针法控制所填筑坡表的植被覆盖度,然后用透明薄膜遮盖静置 2 周再开始试验,其目的是调整土体内部应力状态,使土体内部水分扩散及土粒之间形成胶结,以及增加草体与土体的联结性,促使坡面有草段与裸土段更有效地结合,同时防止水分散失。开始对 3 个雨强下不同植被覆盖度(0,30%,50%,70%,90%)边坡分别降雨,正式降雨前,将降雨强度率定设计降雨强度后,掀开薄膜,从降雨

开始计时,坡面产流后,每隔 4 min 换 1 次雨水回收槽(13.6 L),并把已满的雨水回收槽里的径流泥沙样倒入专用直径 20 cm,口径 7 cm 的雨量桶,至 60 min 后停止降雨,收集全部径流泥沙样。降雨结束后,整理每个过程径流泥沙样进行称重并且记录,静止 24 h 后倒掉上清液,采用烘干法放置在 105 ℃ 烘箱 24 h 后称重,得到累计产沙量。

1.4 数据分析

(1)减沙效益。定义某一植被覆盖度的边坡降雨累计产沙量为 S_n ,则减沙效益的计算公式为:

$$\vartheta = \frac{S_n - S_{n+20}}{S_n} \times 100\%$$
 (1)

式中: ϑ 为减沙效益(%); n 为植被覆盖度大小; S_n 为植被覆盖度为 n 的边坡降雨累计产沙量(g)。

(2)地表径流相对系数。地表径流相对系数为径流量与入渗量的比值,计算公式为:

$$\gamma = R/I$$
 (2)

式中: γ 为地表径流相对系数; R 为径流量(L); I 为入渗量(L)。

(3)Horton 降雨入渗模型公式为:

$$\lambda(t) = \lambda_c + (\lambda_0 - \lambda_c)e^{-kt}$$
 (3)

式中: $\lambda(t)$ 为土壤入渗率(mm/min); λ_c 为稳渗速率(mm/min); λ_0 为初渗速率(mm/min); k 为衰减参数,表示入渗速率随时间减小的程度。

1.5 数据处理

使用 AutoCAD 2020 软件制作实体模型图;采用 Adobe Photoshop 18.0 软件解释获取植被覆盖度;运用 Excel 2013 软件对测定数据进行处理分析;用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被覆盖度和雨强下累计产沙量和减沙效益

坡面累计产沙量是坡面侵蚀过程重要研究内容之一,主要受植被覆盖度和雨强的影响^[22]。本文通过人工模拟降雨试验,研究三峡库区消落带库岸边坡不同植被覆盖度和不同雨强下坡面的累计产沙量和减沙效益。由图 4 可知,在不同雨强下,植被边坡侵蚀累计产沙量均随着植被覆盖度的增加而减小,总体变化趋势分为迅猛—平缓—稳定 3 个阶段。第 1 阶段为迅猛下降阶段,坡面植被覆盖度从 0 增加到 30%时,坡面累计产沙量随着植被覆盖度的增加迅猛下降;第 2 阶段为平缓下降阶段,当坡面植被覆盖度从 50%增加到 70%时,坡面累计产沙量随着植被覆盖度的增加缓慢减小;第 3 阶段为稳定下降阶段,当坡面植被覆盖度达到 70%时,坡面累计产沙量进入相对稳定阶段,植被改善水土流失的能力趋于稳定。尤其在小雨的情况下,当坡面植被覆盖度达到 90%

时,坡面累计产沙量为 0,这主要是因为雨水均下渗到土壤中,没有形成产流。

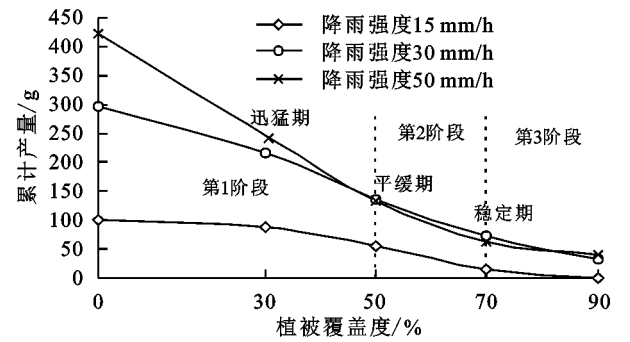


图 4 不同植被覆盖度和降雨强度下的累计产沙量

图 5 为不同植被覆盖度和雨强下的减沙效益。在不同雨强下,植被边坡的减沙效益随植被覆盖度变化趋势主要分为 2 个阶段。第 1 阶段为迅猛增加阶段,坡面植被覆盖度从 0 到 30%对减沙效果影响显著;第 2 阶段为平缓增加阶段,当坡面植被覆盖度从 50%~70%时,坡面减沙效益随着植被覆盖度的增加也持续增加,但增加的幅度总体上比较平缓(在中雨和暴雨的情况下),当植被边坡覆盖度达到 70%时,随后整体上保持增加,但在暴雨的情况下,植被边坡的减沙效益出现拐点。已有研究^[23]表明,只有在植被覆盖程度达到一定程度时,才能有效地降低水土流失。植被覆盖程度可划分为临界盖度和有效盖度 2 种类型。临界盖度是指当植被覆盖度超过这一盖度时,水土保持效果不显著。韩鹏等^[24]、许炯心等^[25]在黄河流域的研究发现,植被覆盖度对于边坡土体的减沙效果存在 1 个临界值,达到临界值后,植被改善水土流失的能力将变得不明显;滕佳昆等^[26]通过 GIS 技术与试验相结合的方法发现,当植被覆盖度增加至一定程度时,减缓降雨侵蚀的能力逐渐减小并最终趋于稳定;戴金梅等^[27]通过模拟降雨试验和室内分析发现,50%以上的植被覆盖度是紫色土坡面有效控制水土流失的临界盖度。不同的区域植被覆盖度的临界值不同,本研究认为,50%~70%植被覆盖度可以视为三峡库区消落带库岸边坡有效控制坡面泥沙流失的临界盖度。

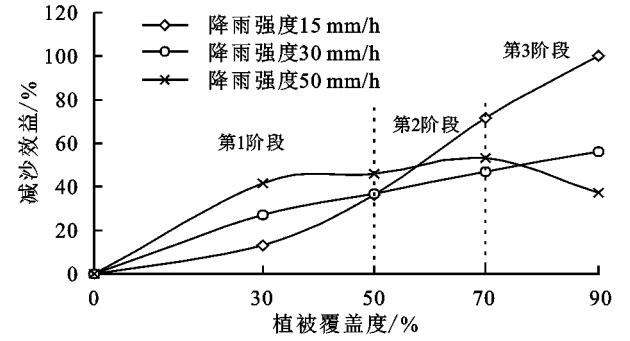


图 5 不同植被覆盖度和降雨强度下的减沙效益

2.2 植被覆盖度和雨强对地表径流相对系数的影响

地表径流是引起土壤侵蚀的主要动力,坡面水土流失的主要影响因素是由降雨引起的坡面径流,而植被对径流的影响主要表现在阻滞地表径流,延长入渗时间。地表径流系数可以反映土体和植被对径流的影响,为探究三峡库区植被覆盖度和雨强对地表径流的影响,绘制3个雨强下地表径流相对系数曲线,研究同一雨强下不同植被覆盖度和不同雨强同一植被覆盖度的地表径流相对系数的变化。

由图6可知,不同雨强条件下,地表径流相对系数随植被覆盖度的增加而降低,变化趋势可分为3个阶段:第1阶段在植被覆盖度0~30%时,地表径流相对系数迅速下降;第2阶段在植被覆盖度50%~70%时,地表径流相对系数进入稳定状态;第3阶段在植被覆盖度70%以后时,在小雨和中雨的情况下,地表径流相对系数迅速下降,但在暴雨的情况下,地表径流相对系数下降趋于平缓。在同一植被覆盖度条件下,随着降雨强度的增加,地表径流相对系数变化逐渐增大,当植被覆盖度为0时(即为裸坡),不同降雨强度下的地表径流相对系数变化最大。在同一雨强条件下,地表径流相对系数随植被覆盖度的增加而降低。这是因为植被具有水土保持功能,阻截降雨动能,使土壤表面免受雨滴直接击溅。当雨强为15 mm/h时,不同植被覆盖度下的地表径流相对系数变化最小。说明雨强和植被覆盖度对地表径流相对系数有显著的影响。

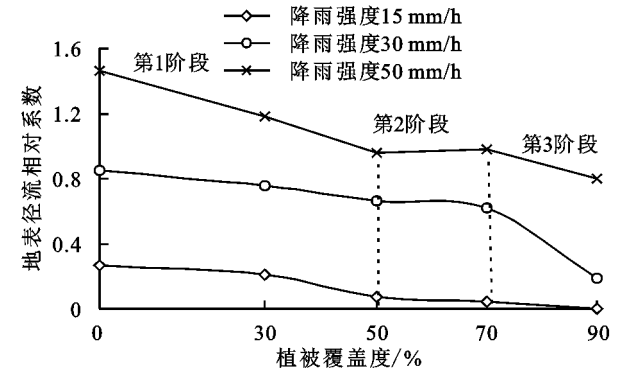


图6 不同植被覆盖度和降雨强度下的地表径流相对系数

2.3 植被覆盖度对土体入渗速率的影响

研究不同植被覆盖度下边坡土体的入渗过程对缓解三峡库区水土流失具有重要意义,可为改善三峡库区日益退化的生态与环境提供一定的参考。本文选用 Horton 降雨入渗模型,研究同一雨强(30 mm/h)下不同植被覆盖度(0,30%,50%,70%,90%)的坡面入渗过程,根据入渗时间与入渗速率绘制出5种不同植被覆盖度下的边坡土体入渗速率曲线,探究植被覆盖度对土体入渗速率的影响。

由表2可知,降雨初期,植被根系的松土作用使土壤入渗量增大,植被茎叶对雨滴截留的作用使入渗量减小,所以不同植被覆盖度下边坡的初始入渗速率与裸坡相比整体差别不大;而70%和90%覆盖度边坡相较于30%和50%覆盖度边坡初始入渗速率均有增大,植被覆盖度50%时边坡初始入渗速率达到最小值,说明在该覆盖度下初始阶段植被根系的松土作用和植被茎叶对雨滴截留的作用达到最佳效果。图7为不同植被覆盖度下的边坡土体入渗速率曲线,在同一雨强下,入渗速率受植被覆盖度的影响3个特征:(1)入渗速率随降雨历时延长而呈降低趋势,第1阶段在降雨前10 min,入渗速率随降雨历时延长迅猛减小;第2阶段在10~20 min,入渗速率随降雨历时延长减小幅度逐渐缓慢;第3阶段在降雨30 min后,入渗速率达到稳定值。整体上植被覆盖度越大,雨期入渗速率越大。(2)在5种植被覆盖度范围内,入渗速率随时间变化关系可表示为幂函数关系,均随着降雨历时的增加而降低。通过对 Horton 入渗公式的拟合结果分析发现,不同植被覆盖度下的拟合所得相关系数(R^2)为0.959,说明拟合程度较好,能够有效反映降雨过程中坡表的入渗过程。在不同植被覆盖度下,边坡土体入渗速率变化趋势基本一致,但对比最小植被覆盖度0(裸坡)和最大植被覆盖度90%的稳定入渗速率相差10倍,表明植被覆盖度对稳定入渗速率的影响起到明显的效果。

表2 入渗速率随时间变化的关系式

植被覆盖度/%	初渗速率(λ_0)/(mm·min ⁻¹)	稳渗速率(λ_c)/(mm·min ⁻¹)	相关系数(R^2)
0	0.310	0.020	0.942
30	0.307	0.008	0.994
50	0.306	0.045	0.956
70	0.314	0.069	0.924
90	0.312	0.229	0.975

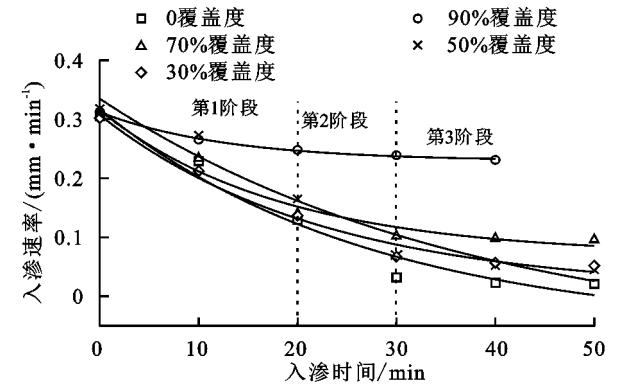


图7 不同植被覆盖度对入渗速率的影响

3 结论

(1)不同雨强下,植被边坡侵蚀累计产沙量均随植被覆盖度的增加呈现下降趋势,整体下降演变

的趋势可分为“迅猛—平缓—稳定”3 个阶段。0~30%植被覆盖范围为迅猛阶段,50%~70%植被覆盖范围为平缓阶段,70%以上植被覆盖范围为相对稳定阶段,其中 50%~70%植被覆盖度可以视为三峡库区消落带库岸边坡有效控制坡面泥沙流失的临界盖度,维持植被覆盖度在此区间可以发挥最大的蓄水保土作用。

(2)由于植被具有阻滞地表径流、减缓土壤侵蚀的作用,在同一雨强条件下,地表径流相对系数均随植被覆盖度的增大而减小。在同一植被覆盖度下,地表径流相对系数随着降雨强度的增加逐渐增大,说明雨强和植被覆盖度对地表径流相对系数均有显著影响。

(3)选用 Horton 降雨入渗模型,分析不同植被覆盖度降雨入渗规律发现,在同一雨强(30 mm/h)下,入渗速率曲线受不同植被覆盖度影响的变化趋势基本一致,大体可分为 3 个阶段,降雨初期(前 10 min)迅速减小,中期(10~20 min)减小幅度逐渐变缓,后期(30 min 后)趋于稳定状态,且整体呈降低趋势。

参考文献:

[1] 符素华,张志兰,蒋光毅,等.三峡库区水土流失综合治理优先小流域识别方法[J].水土保持学报,2020,34(3): 79-83,197.

[2] Lei P, Ni C S, Chen F X, et al. Effects of crop-hedgerow intercropping on the soil physicochemical properties and crop yield on sloping cultivated lands in a purple soil of southwestern China[J].Forests,2021,12(8):e962.

[3] Chen S Q, Zhang G H, Luo Y F, et al. Soil erodibility indicators as affected by water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir area, China[J].Catena, 2021, 207:e105692.

[4] 苏维词,杨华,罗有贤,等.三峡库区涨落带的主要生态环境问题及其防治措施[J].水土保持研究,2003,10(4): 196-198.

[5] 周彬,朱晓强,杨达源.长江三峡水库库岸消落带地质灾害防治研究[J].中国水土保持,2007(11):43-45,58.

[6] 焦朋朋,陈洪凯,张金浩,等.三峡库区消落带滑坡灾害引发生态环境问题的研究进展[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2022,39(2):46-55.

[7] 王志伟,陈志成,艾钊,等.不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012, 26(6):17-20.

[8] 廖义善,蔡强国,程琴娟.黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀产沙地形因子的临界条件[J].中国水土保持科学,2008,6 (2):32-38.

[9] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4): 147-154,182.

[10] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2010,47(3): 401-407.

[11] 丛月,张洪江,程金花,等.草本植物对雨滴动能的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):114-118.

[12] 余芹芹,乔娜,卢海静,等.植物根系对土体加筋效应研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(1):3216-3223.

[13] 肖盛燮,周辉,凌天清.边坡防护工程中植物根系的加固机制与能力分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25 (增刊 1):2670-2674.

[14] 张光辉,梁一民.植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J].水土保持研究,1996,3(2):104-110.

[15] 李裕元,邵明安,陈洪松,等.水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J].生态学报,2010,30(16): 4306-4316.

[16] 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.

[17] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等.野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J].水土保持学报,2005,19 (2):5-8.

[18] 吴希媛,张丽萍.降雨再分配受雨强、坡度、覆盖度影响的机理研究[J].水土保持学报,2006,20(4):28-30.

[19] Marston R. Ground cover requirements for summer storm run off on aspen sites in northern Utah[J].Journal of Forestry,1952,54(4):303-307.

[20] 谌芸,祝亚军,何丙辉.三峡库区狗牙根根系固坡抗蚀效应研究[J].水土保持学报,2010,24(6):42-45.

[21] 高琦,徐明,李波,等.近 40 年三峡库区面雨量时空分布特征[J].气象科技进展,2018,8(4):76-81.

[22] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.

[23] 王葆,程金花,王文凯,等.北京北部褐土区 2 种典型植物措施减流减沙效应[J].水土保持学报,2017,31(3): 56-61,68.

[24] 韩鹏,李秀霞.黄河流域土壤侵蚀及植被水保效益研究[J].应用基础与工程科学学报,2008,16(2):181-190.

[25] 许炯心,孙季.无定河水土保持措施减沙效益的临界现象及其意义[J].水科学进展,2006,17(5):610-615.

[26] 滕佳昆,刘宇.坡面径流冲刷侵蚀的植被覆盖阈值现象研究[J].中国水土保持,2018(4):42-45,69.

[27] 戴金梅,查轩,黄少燕,等.不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):33-38.