

喀斯特区工程堆积体坡面产流特征对降雨强度的响应

祝怀春^{1,3}, 高儒学², 戴全厚^{1,3}, 姚一文^{1,3}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 中共贵州省委党校, 贵阳 550025;

3. 贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025)

摘要: [目的] 研究降雨强度对喀斯特区土石混合工程堆积体坡面产流的影响, 以期对堆积体水文特性研究提供更加深入的科学依据, 为堆积体生态修复提供理论参考。[方法] 从研究区内典型的土石混合工程堆积体获取试验材料, 通过室内模拟降雨试验的研究方法, 研究典型坡度(30°)和典型砾石(体积分数30%)工程堆积体坡面在不同雨强(50、70、90、110 mm/h)下的产流特性。[结果] 1) 土石混合工程堆积体坡面产流包括地表、壤中及地下3种方式, 且主要以壤中流及地下产流为主, 地表产流比率随降雨强度增大而减小。2) 工程堆积体坡面地表径流随降雨时间变化表现为先快速增大后逐渐减小再逐步趋于稳定的趋势, 峰值多数在降雨开始后30 min左右出现。壤中流随降雨时间的增加先增大后趋于稳定, 趋于稳定的时间点随雨强的增大而延迟, 且相较于地表产流更为平缓。地下产流整体表现为先增大后减小趋势, 转折时间点多数在降雨开始后70~90 min。3) 降雨强度与工程堆积体坡面各径流类型产流之间呈极显著正相关($p < 0.01$), 相关系数均在0.7以上。[结论] 喀斯特区土石混合工程堆积体坡面产流方式包括地表、壤中及地下3种, 其中壤中流及地下产流占主导地位。降雨强度的变化对堆积体坡面产流具有显著影响, 各类型产流量均随降雨强度的增大相应增加。

关键词: 降雨强度; 工程堆积体; 产流; 喀斯特地区

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0070-08

Response of Runoff Production Characteristics of the Slope of Engineering Accumulation to Rainfall Intensity in Karst Areas

ZHU Huaichun^{1,3}, GAO Ruxue², DAI Quanhong^{1,3}, YAO Yiwen^{1,3}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Party School of the Guizhou Provincial Committee, Guiyang 550025, China; 3. Soil Erosion and Ecological Restoration Research Centre,

Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the influence of rainfall intensity on runoff production of the slope of accumulation body of earth-rock mixing engineering in karst areas, in order to provide a deeper scientific basis for the study of hydrological characteristics and theoretical reference for ecological restoration of the accumulation. [Methods] The experimental materials were obtained from typical accumulation body of earth-rock mixing engineering in the study area, and runoff production characteristics of the engineering accumulation with typical slope (30°) and gravel content (30%) were studied at different rainfall intensities (50, 70, 90 and 110 mm/h) by using indoor simulated rainfall experiment. [Results] 1) The runoff production on the slope of the accumulation body of earth-rock mixing engineering included three types, namely surface runoff, interflow, and subsurface runoff, with interflow and subsurface runoff being the dominant forms. The proportion of surface runoff production decreased with the increase of rainfall intensity. 2) Surface runoff on the slope of the engineering

收稿日期: 2024-11-11

修回日期: 2024-12-27

录用日期: 2025-01-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(42007054, 42167044); 贵州省高层次人才项目(黔科合平台人才[2018]5641); 贵大培育项目(贵大培育[2019]10号)

第一作者: 祝怀春(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态恢复重建研究。E-mail: 16685519869@163.com

通信作者: 戴全厚(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

accumulation body changed with the time of rainfall, first increased rapidly, then gradually decreased, and then gradually stabilized over time, with peak values appearing about 30 min after the start of rainfall. The interflow increased first and then stabilized over time, with the stabilization point delayed with the increase of rain intensity, showing a smoother trend compared to surface runoff. Subsurface runoff generally increased first and then decreased, with most of the turning points occurring between 70 and 90 min after the start of rainfall. 3) There was a significant positive correlation between rainfall intensity and runoff production of all runoff types on the engineering accumulation slope ($p < 0.01$), and all correlation coefficients were above 0.7. [Conclusion] The runoff production on the slope of the accumulation body of earth-rock mixing engineering in karst areas includes surface runoff, interflow, and subsurface runoff, among which interflow and subsurface runoff are dominant. Changes in rainfall intensity have a significant impact on the runoff production on the accumulation slope, and the runoff of each type increases with the increase of rainfall intensity.

Keywords: rainfall intensity; engineering accumulation; runoff production; karst area

Received: 2024-11-11

Revised: 2024-12-27

Accepted: 2025-01-10

Online (www.cnki.net): 2025-03-27

中国经济自21世纪起便步入高速发展的轨道,由此催生大量的生产建设项目,涵盖房地产项目、道路建设(特别是线性工程)、水利设施及矿产资源开发等多个关键领域。由生产建设项目所遗留的废土与废渣堆积而成的工程堆积体,以其特有的结构形态、多样化的物质构成以及松散的土质特性,显著地成为引发水土流失问题的关键性因素之一^[1]。同时,这些新形成的构造在遭遇土壤侵蚀时,其侵蚀程度相较于原始地貌显著加剧^[2-3]。此类侵蚀展现出多样化的形态,同时伴随着高强度的侵蚀力、广泛的破坏范围及强烈的突发性^[4]。有研究^[5]表明,水电开发项目区土壤侵蚀模数排序依次为渣场区域最高,其次为路堑边坡,再次为料场,随后是路堤边坡,主体工程区则位列其后,施工活动所扰动的地表区域的土壤侵蚀模数与未受施工干扰的原始地貌相比,呈3~10倍显著增加。工程堆积体所引发的水土流失现象,构成一种特定类型的人为加速侵蚀过程,该现象的成因具有高度的复杂性,涉及多种因素交织影响,其表现形式亦呈多样化特点,涵盖不同类型的侵蚀模式。此类水土流失所造成的危害程度广泛且深远,对生态环境及人类社会均构成显著威胁,引起学术界与实践领域的广泛关注与深入研究^[6-7]。

降水的变化对水资源的地域和时间分配及农业生产具有显著影响,并且还是水土流失、泥石流等自然灾害的诱因。尽管多种因素共同影响着堆积体的水土流失状况,但总体而言,不论哪种土壤类型的工程堆积体,其产流、产沙均与降雨强度存在正相关关系,然而,降雨强度的不同和土壤类型的差异导致坡面产流、产沙的变化趋势有所区别^[8-11],郭培龙等^[12]

研究表明,关中塬土工程堆积体坡面平均径流率在相同坡面不同雨强时存在显著差异;景民晓等^[13]进一步研究表明,降雨强度与堆积体平均径流率及平均侵蚀率之间存在的关联性,可通过线性函数模型进行数学表达;史倩华等^[14]的研究也发现,堆积体产沙量与降雨强度之间呈线性相关规律。已有研究^[15-16]发现,堆积体总侵蚀量与降雨强度之间存在指数函数关系;赵满等^[17]指出,次降雨侵蚀量随雨强增大呈显著的幂函数关系;芮茂刚等^[18]研究发现,随降雨强度增大,砾石对红壤堆积体侵蚀调控作用发生改变,存在临界降雨强度;郑腾辉等^[19]研究表明,各坡面径流率随雨强增大呈稳定增长一波动的变化趋势;牛耀彬等^[20]则指出,在降雨条件下,堆积体坡面侵蚀过程呈现阶段性差异发育,中小雨强和大雨强呈现不同形态。然而,工程堆积体因其内部土石混杂的特性而促使孔隙结构显著发育^[21],此结构特点使得雨水在下渗过程中易于裹挟泥沙并迁移至堆积体的底部区域,进而可能诱发水土漏失的现象。假设堆积体存在水土漏失现象,那么其与坡面地表流失相比,比重状况如何?降雨强度是如何影响其产流的?目前学术界尚未达成明确的研究共识或形成定论。

鉴于此,本研究选取喀斯特地区的土石混合工程堆积体作为研究对象,运用模拟降雨试验,探究其坡面产流特征对降雨强度的响应,以期为喀斯特区工程堆积体水土流失防治提供参考依据,为推动水土保持工作的高质量发展及生态文明建设贡献力量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究位于贵州省贵阳市花溪区,(26°11'~

26°34'N, 106°27'~106°52'E), 位于苗岭山脉的中段区域, 长江与珠江的分水岭之上, 海拔 999~1 656 m, 国土面积 964.14 km²。从地形地貌角度来看, 花溪区主要以山地与丘陵地形为主。在地质构造层方面, 该地域属于扬子准地台之下的一个次级构造组成部分, 即黔北台隆中的遵义断裂拱起区域, 具体位于贵阳复杂形变带内, 其地质基底包含从泥盆纪至第四纪等多个地质年代的红色黏土(即古老风化层)及其他岩石类型。气候方面, 花溪区呈典型的中亚热带湿润季风气候特征, 兼具高原季风气候的某些特点, 表现为气候温和、雨热同季、降水充沛但季节性分布不均, 夏秋季节降水较为丰富; 年平均气温维持在 15.6℃, 年降水量充沛(1 450.8 mm), 年日照时间充足(1 287.4 h), 而无霜期则达 270 d。花溪区属于中亚热带常绿阔叶林带; 该区域土壤类型以黄壤、石灰土和水稻土为主。

1.2 研究材料

本研究中所涉及的试验材料取自花溪区石板镇石一村, 毗邻贵安大道的一处线性土石混合工程堆积体内, 该堆积体是 2013 年修建贵安大道形成。堆积体土壤主要由碳酸盐岩经过长期地质作用发育演化而来的石灰土。试验土壤质地为砂粒(2~0.05 mm) 49.36%, 粉粒(0.05~0.002 mm) 30.97%, 黏粒(<0.002 mm) 19.67%, 土壤体积质量为 1.38 g/cm³。

1.3 研究方法

1.3.1 试验设计 根据前期野外调查结果显示, 研究区范围内线性工程堆积体砾石体积分数主要集中在 27.6%~46.5%, 坡度主要集中在 28°~46°; 降雨强度根据张文源等^[22]研究结果, 研究区侵蚀性降雨 90% 在 50~120 mm/h 进行设置。因本研究目的在于初步揭示堆积体地下径流存在与否, 故孔隙度设置为 1%。因此, 试验设计选取较具代表性的砾石体积分数、坡度及雨强 3 个处理, 即探究坡度为 30°、砾石体积分数为 30%, 不同雨强(50、70、90、110 mm/h)下堆积体坡面产流特征。试验重复 3 次, 共计 12 场降雨。试验于 2020 年 5 月在贵州大学南校区径流场降雨大厅内进行。

1.3.2 试验设备 本研究采用的试验装置涵盖试验钢槽、降雨模拟系统及径流收集系统三大核心组件(图 1)。试验钢槽是课题组创新设计的, 具备可变坡度与孔隙度调节功能, 其尺寸规格为长度 2.0 m、宽度 0.75 m、高度 0.65 m; 其底部装配 2 块活动打孔钢板, 可通过精确调控 2 块钢板间圆孔的重叠程度以调整孔隙度, 范围为 0~6%。钢槽的倾斜角度可以通过滑轮在 0~45°自由调节。为全面收集径流, 钢槽内部

分别集成地表径流与地下径流的收集槽; 同时, 钢槽周边设置 3 层壤中流收集槽, 旨在收集并区分来自不同土壤层次的壤中流。降雨模拟方面, 本研究选用高性能的 SK-S20-W1100 型便携式全自动降雨模拟器, 其支持手动调控降雨强度, 从 10~200 mm/h 不等, 降雨均匀度超过 70%。在试验准备阶段, 于钢槽周边安装雨量筒以校准和验证降雨强度。试验地位于贵州大学南校区径流场。

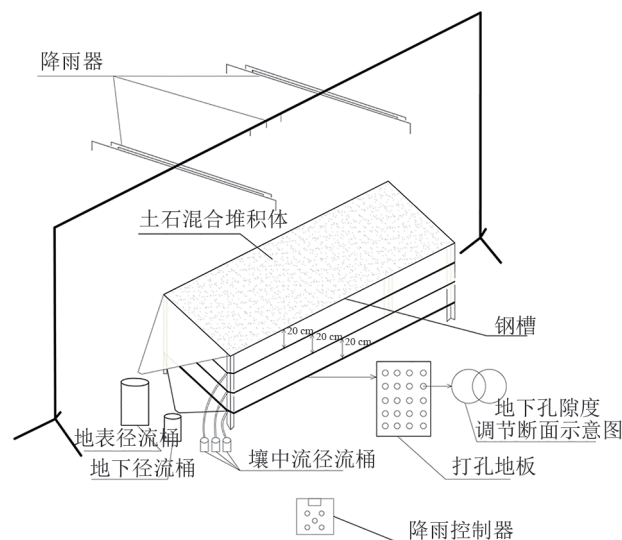


图 1 模拟降雨试验装置

Fig. 1 Simulated rainfall test device

1.3.3 试验处理 首先, 将试验所用的土壤进行自然风干处理, 此过程中需将大块土壤适度分散, 并仔细剔除混杂其中的枯枝、落叶及其他杂质。同时根据 MILLER 等^[23]和甘凤玲等^[24]对土壤中碎石的划分结果, 将本试验粒径划分为大碎石(>60 mm)、中碎石(10~60 mm)、小碎石(2~10 mm)及细土(<2 mm), 风干土样分别过相应的筛, 并且将各粒级碎石按照 1:1 比例混合作为试验用。

1.3.4 试验方法 在试验开始前, 先通过钢槽底部装配 2 块活动钢板将孔隙度调整至 1%, 然后将试验用的土壤和砾石均匀填充至钢槽内, 分 3 层填充, 每层 20 cm; 同时, 为减少边界效应对试验结果的影响, 使用特制的木板对土壤表面进行平整处理, 并压实土壤边缘区域; 随后降 30 min 的小雨(15 mm/h)后用塑料薄膜覆盖土壤并静置 24 h, 使其均匀沉降。在试验正式开始之前, 先对降雨强度进行精确校准, 以确保其满足试验设计要求。降雨强度达到预定标准, 迅速移除塑料薄膜, 并开始密切观察土壤水分的饱和及产流情况。一旦观测到产流出现, 即刻启动计时装置, 并着手进行水样采集工作。整个模拟降雨过程历时 100 min。在此期间, 每间隔 10 min 利用专用的接样桶分别收集 1 次地表径流、壤中流及地下径

流。对每个接样容器进行唯一性编号,并随后进行静置处理,静置时长为 24 h,以充分促进泥沙颗粒的沉降。径流量通过使用高精度的大量筒(精度为 0.01 L)测定,其中地表径流和地下径流的测量,则是在静置 24 h 后进行测定,且在测量过程中,使用注射器小心吸取容器底部的少量径流,尽可能避免扰动已经沉降于容器底部的泥沙,以确保测量结果的准确性。

2 结果与分析

2.1 堆积体坡面产流量

由表 1 可知,在本研究设置的 4 个降雨强度(50、70、90、110 mm/h)下,工程堆积体坡面产流均出现产流情况,且产流方式包括地表产流、壤中流产流及地下产流 3 种方式,表明在研究区侵蚀性降雨范围(50~120 mm/h)内,工程堆积体均因为降雨而出现水土流失的情况。同一降雨强度下,工程堆积体产流量及产流模数均表现为地表产流<壤中流<地下产流,反映碎石和土壤颗粒之间的空隙可能形成良好的渗透通道,有利于水分的垂向渗透,从而致使更多的水分渗透到地下,形成地下水;另一方面,地表、壤中流和地下 3 个主要产流路径的产流量均随降雨强度的增加而显著上升。其中,地表产流量的增加与土壤水分的快速增加与径流加速有关,反映强降雨对地表径流的直接影响。壤中流产流量的增加可能与土壤水分的快速渗透和地下水位的上升相关,表明强降雨促进土壤水分的垂向运动;地下产流量的增加进一步证实强降雨对地下水位的显著影响,说明强降雨条件下地下水位的上升更为显著。随着降雨强度的增加,各产流路径的产流模数也呈上升趋势;产流模数的增加反映单位面积和单位时间内的产流量增加,进一步反映出强降雨对土壤水分和地下水位的强烈影响。该影响可能造成土壤侵蚀的加剧、地下水位的上升及可能引发地质灾害,从而对生态环境造成破坏,同时也增加工程堆积体周边水资源管理的难度和复杂性。

2.2 堆积体坡面产流比例

由图 2 可知,3 种类型的径流占比中,地表径流占比整体处于最低水平,为 18.77%~19.30%;而地下径流占比最高,为 44.09%~44.65%;壤中流占比位于二者之间,为 36.41%~31.76%。从总体趋势来看,随着降雨强度的增加,地表径流占比呈递减趋势;壤中流占比则逐渐增大;相比之下,地下径流占比随降雨强度的变化并未表现出明显的规律性。综合分析结果显示,在本研究试验条件(坡度为 30°、砾

石体积分数为 30%)下,壤中流与地下径流占据相对较大的比例。综上,工程堆积体坡面壤中流是一个不可忽视的水文过程,尽管其影响相对地表水较小,但对整体水文循环仍具有一定贡献。同时,地下水的产流比例在降雨强度增加时保持相对稳定,可能与地下水的储存和补给机制有关,显示出地下水在水文循环中的稳定性和重要性,其产流比例的稳定性对于维持生态平衡和水资源管理具有重要意义。

表 1 不同降雨强度下工程堆积体坡面产流量

Table 1 Runoff production on the slope of the engineering accumulation under different rainfall intensities

产流类型	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	产流量/L	产流模数/ (L·h ⁻¹ ·m ⁻²)
地表产流	50	13.3±2.3	6.1±1.0
	70	15.1±2.4	7.0±1.1
	90	17.0±1.5	7.9±0.7
	110	19.0±2.5	8.8±1.1
壤中流	50	25.1±4.3	11.6±2.0
	70	28.9±4.6	13.3±2.1
	90	32.7±2.9	16.4±1.4
	110	37.2±4.8	17.2±2.2
地下产流	50	30.5±5.2	14.1±2.4
	70	34.7±5.6	16.0±2.6
	90	40.1±3.6	18.5±1.7
	110	45.0±5.9	20.8±2.7

注:表中数据为平均值±标准差。

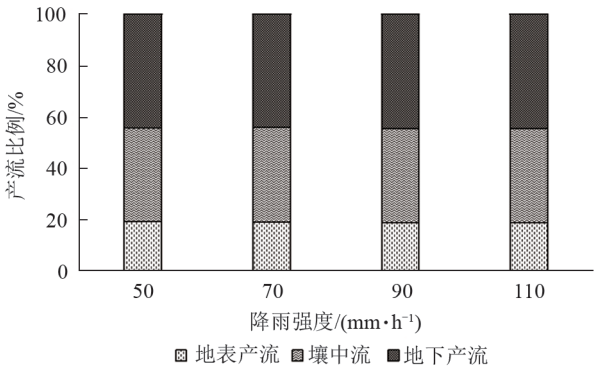


图 2 不同降雨强度下工程堆积体坡面产流比例

Fig. 2 The proportion of runoff production on the slope of the engineering accumulation under different rainfall intensities

2.3 不同降雨强度下工程堆积体坡面产流过程

由图 3 可知,工程堆积体地表、壤中流及地下产流量整体上均表现为随雨强的增大而增大,且各类型径流量差异明显;整个降雨过程当中,无论是地表、壤中流,还是地下产流量,在大多数时间内均表现为 110 mm/h>90 mm/h>70 mm/h>50 mm/h。地表径流在降雨初期(20 min 内)整体均较小,然后快速增大,之后逐渐下降,最后波动变化并趋于稳定,雨强越大,其整体变化趋势波动越明显;其中,峰值

出现的时间因雨强不同而异,雨强 50 mm/h 时为第 30 min,雨强 70 mm/h 时延迟至第 50 min,而雨强 90、110 mm/h 时提前至第 30 min。可能与地表的渗透能力和径流路径的饱和程度有关。壤中流整体表现为随降雨时间的增加先增大后趋于稳定,雨强越大,整个过程波动变化也越明显,趋于稳定的时间点也存在一定区别,雨强为 50 mm/h 时为第 70 min,雨强 70、90 mm/h 时延迟至第 80 min,而雨强 110 mm/h 时延迟至第 90 min。壤中流的变化趋

势整体而言较地表产流更为平缓,反映出土壤对降雨的缓冲和调节作用。地下产流量随降雨时间的变化过程有一定差异,整体表现为在降雨后期逐渐增加,与地下水的渗透和储存特性相符;雨强 50 mm/h 时表现为先增大后减小,转折时间点出现在第 90 min;而雨强 70、90、110 mm/h 时整体表现为先增大后减小的变化趋势,雨强为 70、110 mm/h 时转折时间点出现在第 70 min,而雨强 90 mm/h 时为第 80 min。

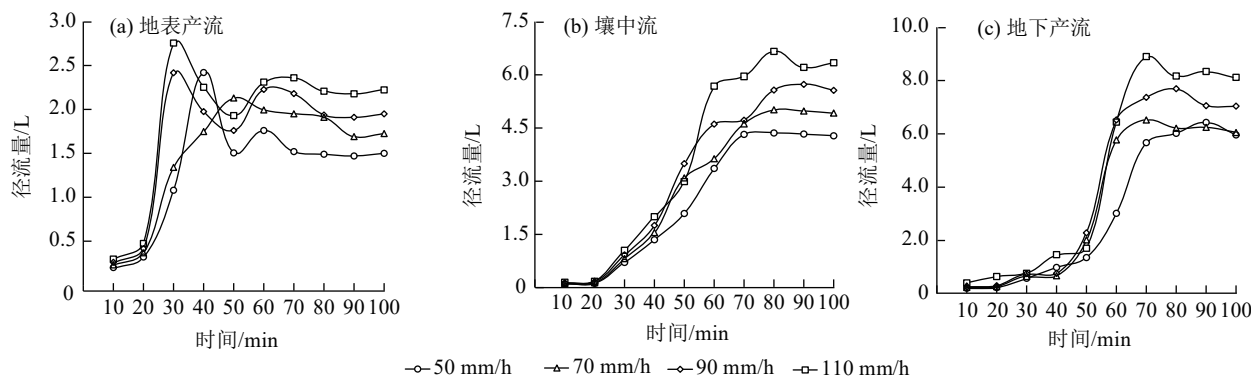


图 3 不同降雨强度下工程堆积体坡面产流过程

Fig. 3 The runoff production process on the slope of the engineering accumulation under different rainfall intensities

2.4 降雨强度与堆积体坡面产流相关性分析

为进一步探明降雨强度对工程堆积体坡面产流的影响,对降雨强度和产流量进行相关性分析可知,降雨强度与工程堆积体坡面各类型产流之间均呈极显著正相关($p < 0.01$),且相关系数均在 0.7 以上。其中,地表产流量与降雨强度的相关性系数为 0.765,表明二者之间存在较强的正相关;壤中流产流与降雨强度的相关性系数为 0.791,显示出更高的正相关;地下产流与降雨强度的相关性系数为 0.793,同样呈显著正相关。

3 讨论

研究工程堆积体的坡面产流特征有助于了解坡面水流的形成和运动规律,从而制定更为有效的水土保持措施,以减少土壤侵蚀,保护生态环境,维护生态平衡。本研究发现,在研究区侵蚀性降雨范围内,工程堆积体坡面均产生地表产流、壤中流产流及地下产流 3 种方式,此发现对于理解工程堆积体在降雨条件下的水土流失机制具有重要意义。同时,在本试验条件下,堆积体地表径流所占比率整体较小,壤中流及地下产流是堆积体主要的产流方式,这表明砾石和土壤颗粒之间的空隙可能形成良好的渗透通道,促进水分的垂向渗透。研究结果有助于解释工程堆积体内部的水分运动规律及预测其水文响应,而具体机制仍需进一步深入探究。甘凤玲等^[24]通过人工模拟降雨研究滑坡堆积体指出,土石比为

1:2、雨强为 1.0 mm/h 时坡面没有产流产沙,土石比达到 1:4 时整个试验过程中坡面均没有产流产沙,与本研究存在一定的相似之处。反映出当砾石含量超过某一特定临界值时,堆积体坡面将不再形成地表径流,雨水几乎全部以入渗和壤中流的形式存在,而这一临界值有待进一步深入探究。堆积体的产流方式主要为蓄满产流,降雨强度的变化直接影响其入渗量,进而对其内部水分的二次分布产生作用^[25]。本研究发现,壤中流和地下产流过程的变化趋势存在一定相似性,且二者的变化趋势较地表产流更为平缓,表明土壤对降雨具有一定的缓冲和调节作用。而堆积体的内部结构、土壤性质及降雨条件等多种因素均影响其产流过程。未来研究可进一步探讨这些因素对产流过程的影响机制。

本研究显示,降雨强度对喀斯特区工程堆积体地表产流、壤中流产流及地下产流的影响呈极显著正相关,进一步验证降雨是驱使堆积体坡面产流的主要因素之一。JIANG 等^[10]研究发现,堆积体坡面径流量随降雨强度的增加而增加;戎玉博等^[15]对陕西杨凌周边开发建设项目弃土堆积体进行研究也得出同样的规律;景民晓等^[13]对弃土堆置体研究指出,降雨强度与平均径流率呈线性关系;史倩华等^[14]研究发现,堆积体坡面径流与降雨强度之间呈显著幂函数关系,且降雨强度是主要的影响因素。这些研究结果均与本研究所得结论相吻合,共同强调降

雨强度在堆积体坡面产流过程中的重要性。土石混合工程堆积体因其独特的物质构成,在产流及输沙过程中,经历着一个持续的水沙相互作用与调整阶段。因此,本研究发现,地下径流在降雨强度为110 mm/h并持续至70 min时,观测到的径流突然减少现象,是由于堆积体内部孔隙被下渗的土壤颗粒逐渐堵塞所致,且这些土壤颗粒可能沿着堆积体内部的孔隙向下流失。在产流过程方面,地表径流整体表现为随降雨时间先快速增大后逐渐减小,最后在波动变化中逐步趋于稳定。景民晓等^[13]、史倩华等^[14]前期研究亦呈相同的趋势。但速欢等^[26]研究发现,堆积体径流率随降雨时间的变化呈波动性变化,并随雨强的增大而加剧;张文博等^[27]指出,堆积体坡面的流速及单位面积的径流率表现为先迅速增加,再缓慢增长,最终达到稳定波动的变化阶段。前人的研究与本研究存在一定异同,然而,前人的研究尚未考虑到壤中流和地下径流的存在和影响,本研究为理解降雨强度对堆积体产流的影响提供宝贵的视角和证据,为未来的研究提供新的方向和思路。

4 结论

1) 土石混合工程堆积体边坡产流存在地表产流、壤中流及地下产流3种类型;产流量及产流模数均表现为地表最小,壤中流次之,地下最大;地表产流所占比率随降雨强度的增大而逐渐减小。反映出碎石和土壤颗粒间的空隙形成良好的渗透通道,促进水分的垂向渗透。

2) 土石混合工程堆积体的地表径流随降雨时间变化表现为先快速增大后逐渐减小再逐步趋于稳定的趋势,峰值出现的时间受雨强影响,但多数在降雨开始后30 min左右出现。壤中流随降雨时间的增加先增大后趋于稳定,趋于稳定的时间点随雨强的增大而延迟,且相较于地表产流更为平缓,反映土壤对降雨的缓冲和调节作用。地下产流整体表现为先增大后减小趋势,转折时间点受雨强影响,但多数在降雨开始后70~90 min出现。

3) 降雨强度与土石混合工程堆积体坡面各类型产流之间存在极显著正相关($p < 0.01$),且相关系数均在0.7以上。地表产流量与降雨强度的相关性系数为0.765,壤中流产流与降雨强度的相关性系数为0.791,地下产流与降雨强度的相关性系数为0.793。

参考文献:

[1] 高儒学,戴全厚,伍小涛,等.喀斯特区土石工程堆积体坡面植被恢复评价[J].水土保持研究,2024,31(5):45-52.

GAO R X, DAI Q H, WU X T, et al. Assessment on vegetation restoration on the slope surface of accumulation body of earth-rock mixing engineering in karst area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5):45-52.

[2] RILEY S. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia [J]. Applied Geography, 1995, 15(4):309-323.

[3] 李魁,王文龙,李建明.工程堆积体流速及产沙特征对坡长及砾石作用响应[J].水土保持学报,2023,37(5):48-56.

LI K, WANG W L, LI J M. Response of velocity and sediment production characteristics of spoil heaps to slope length and gravel action [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):48-56.

[4] 晏伟明,谢颂华,刘苑秋,等.生产建设项目边坡及弃土侵蚀影响机制研究进展[J].中国水土保持科学,2016,14(4):142-152.

YAN W M, XIE S H, LIU Y Q, et al. Research progress on the erosion mechanism of side slope and dumped soil in production and construction projects [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(4):142-152.

[5] 吴亮亮,舒安平,张乃畅,等.黄河上游水电开发扰动地表土壤侵蚀特点分析[J].人民黄河,2012,34(1):86-88.

WU L L, SHU A P, ZHANG N C, et al. Analysis of characteristics of disturbance surface soil erosion in the upstream of Yellow River hydropower development [J]. Yellow River, 2012, 34(1):86-88.

[6] LI J M, LI L, WANG Z G, et al. The contributions of the roots, stems, and leaves of three grass species to water erosion reduction on spoil heaps [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603:e127003.

[7] SINGH P D, KLAMERUS-IWAN A, HAWRYŁO P, et al. Possibility of spatial estimation of soil erosion using Revised Universal Soil Loss Equation model and generalized additive model in post-hard coal mining spoil heap [J]. Land Degradation and Development, 2024, 35(3):923-935.

[8] 聂慧莹,王文龙,郭明明,等.降雨条件下2种土壤类型工程堆积体坡面水沙关系与侵蚀动力特征[J].应用生态学报,2020,31(9):3141-3153.

NIE H Y, WANG W L, GUO M M, et al. Runoff-sediment relationship and erosion dynamic characteristics for two types of engineering deposits under rainfall condition [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9):3141-3153.

[9] LI J M, WANG W L, GUO M M, et al. Effects of soil texture and gravel content on the infiltration and soil loss of spoil heaps under simulated rainfall [J]. Journal of Soils

- and Sediments, 2020, 20(11):3896-3908.
- [10] JIANG F S, ZHAN Z Z, CHEN J L, et al. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain [J]. Catena, 2018, 169:46-58.
- [11] GUO M M, WANG W L, LI J M, et al. Runoff characteristics and soil erosion dynamic processes on four typical engineered landforms of coalfields: An in situ simulated rainfall experimental study [J]. Geomorphology, 2020, 349:e106896.
- [12] 郭培龙, 王文龙, 李建明, 等. 关中黄土工程堆积体坡面径流和产沙对坡长及砾石含量的响应[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3):749-758.
- GUO P L, WANG W L, LI J M, et al. Responses of runoff and sediment yield to slope length and gravel content of Lou soil engineering accumulation slope in Guanzhong region, northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3):749-758.
- [13] 景民晓, 谢永生, 赵暄, 等. 土石混合弃土堆置体产流产沙模拟研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6):11-15.
- JING M X, XIE Y S, ZHAO X, et al. Runoff and sediment yield modeling on spoilbank with soil-stone mixture [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6):11-15.
- [14] 史倩华, 王文龙, 郭明明, 等. 模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9):2673-2680.
- SHI Q H, WANG W L, GUO M M, et al. Runoff and sediment yielding processes on red soil engineering accumulation containing gravels by a simulated rainfall experiment [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9):2673-2680.
- [15] 戎玉博, 骆汉, 谢永生, 等. 雨强对工程堆积体侵蚀规律和细沟发育的影响[J]. 泥沙研究, 2016, 41(6):12-18.
- RONG Y B, LUO H, XIE Y S, et al. Effect of rainfall intensity on erosion and rill evolution of engineering piles [J]. Journal of Sediment Research, 2016, 41(6):12-18.
- [16] 戎玉博, 白玉洁, 王森, 等. 含砾石锥状工程堆积体坡面径流侵蚀特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1):109-115.
- RONG Y B, BAI Y J, WANG S, et al. Characteristics of slope runoff erosion on the cone shaped engineering accumulation with gravel [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1):109-115.
- [17] 赵满, 王文龙, 郭明明, 等. 不同砾石含量黄土堆积体坡面侵蚀特征研究[J]. 土壤学报, 2020, 57(5):1166-1176.
- ZHAO M, WANG W L, GUO M M, et al. Erosion of slopes of Lou soil stacks different in gravel content [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1166-1176.
- [18] 芮茂刚, 周彦辰. 红壤工程堆积体坡面径流水动力特性研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3):143-152.
- RUI M G, ZHOU Y C. Study on the dynamic hydrodynamic characteristics of runoff on the slope of red soil engineering accumulation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3):143-152.
- [19] 郑腾辉, 周旺, 刘涛, 等. 连续模拟降雨下岩溶区含砾石堆积体坡面径流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3):55-60.
- ZHENG T H, ZHOU W, LIU T, et al. Characteristics sediment yield and runoff on the slope surface of gravel accumulation in karst area under continuous simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3):55-60.
- [20] 牛耀彬, 吴旭, 高照良, 等. 降雨和上方来水条件下工程堆积体坡面土壤侵蚀特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8):69-77.
- NIU Y B, WU X, GAO Z L, et al. Characteristics of soil erosion on engineering accumulation slope under the rainfall and inflow conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8):69-77.
- [21] 高儒学, 戴全厚, 甘艺贤, 等. 土石混合堆积体坡面土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6):1-8.
- GAO R X, DAI Q H, GAN Y X, et al. Research progress on soil erosion on the slope surface of soil-rock mixed engineering accumulation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6):1-8.
- [22] 张文源, 王百田, 杨光敏, 等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11):1776-1782.
- ZHANG W Y, WANG B T, YANG G X, et al. Erosive rainfall and characteristics analysis of sediment yield on yellow soil area in karst mountainous [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(11):1776-1782.
- [23] MILLER F T, GUTHRIE R L. Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States [M]//Erosion and Productivity of Soils Containing Rock Fragments. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 2015:1-6.
- [24] 甘凤玲, 何丙辉, 王涛. 人工模拟降雨下汶川震区滑坡堆积体产沙规律 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(12):158-164.
- GAN F L, HE B H, WANG T. Sediment characteristic of landslide accumulation body in earthquake zone of Wenchuan under artificial rainfall simulation condition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12):158-164.
- [25] 甘凤玲, 王涛, 何丙辉. 汶川震区滑坡堆积体壤中流产流规律研究 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(5):69-75.
- GAN F L, WANG T, HE B H. Characteristic of interflow production processes on the landslide deposit in

- Wenchuan earthquake area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 69-75.
- [26] 速欢, 王文龙, 康宏亮, 等. 砾石对关中塬土工程堆积体产流产沙的影响[J]. 水力发电学报, 2019, 38(10): 59-74.
- SU H, WANG W L, KANG H L, et al. Effect of gravel on runoff and sediment yield from Lou soil engineering accumulation in Guanzhong region[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(10): 59-74.
- [27] 张文博, 吕佼容, 谢永生, 等. 不同形态工程堆积体产流产沙对比研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 49-54.
- ZHANG W B, LÜ J R, XIE Y S, et al. Comparative study on runoff and sediment yielding in different morphological engineering accumulations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 49-54.
- (上接第69页)
- [25] PENG X H, ZHU Q H, ZHANG Z B, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 109: 81-94.
- [26] 马敢敢. 雨滴击溅对表层土壤结构和入渗特征的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- MA G G. Effect of raindrop splash on surface soil structure and infiltration characteristics[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [27] 胡波, 王玉杰, 王彬, 等. 自然降雨条件下结皮层团聚体稳定性变化特征研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 225-231.
- HU B, WANG Y J, WANG B, et al. Dynamics of stability of soil crust under natural rainfall event[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 225-231.
- [28] 焦钊棚, 侯卫亮, 李光录. 降雨条件下土壤胶结状况与团聚体分布特征研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 109-118.
- JIAO F X, HOU W L, LI G L. Study on soil cementation and aggregate distribution characteristics under rainfall conditions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 109-118.
- [29] 李建德. 土壤结皮发育特征及其对入渗的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- LI J D. Characteristics of soil crust development and its influence on infiltration[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [30] 刘志强, 张晓茹, 焦钊棚, 等. 连续性与间歇性降雨下土壤结皮与入渗的关系模拟[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 64-72.
- LIU Z Q, ZHANG X R, JIAO F X, et al. The relationship between soil crust and infiltration under simulation continuous and intermittent precipitation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 64-72.
- [31] 陈琳. 坡耕地微地形侵蚀表层颗粒分选特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- CHEN L. Study on sorting characteristics of micro-topography erosion surface particles in sloping farmland[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [32] 陈正发, 夏清, 史东梅, 等. 基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 6-11.
- CHEN Z F, XIA Q, SHI D M, et al. Soil surface crust characteristic and response feature to slope erosion base on simulation rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 6-11.
- [33] 张晓娅, 徐金忠, 杨庆楠, 等. 间歇性降雨条件下黑土溅蚀团聚体分选特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 31-39.
- ZHANG X Y, XU J Z, YANG Q N, et al. Sorting characteristics of black soil splash erosion aggregates under intermittent rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 31-39.
- [34] FENG R K, LIU G H, CHEN Y R, et al. Impacts of rainfall-induced physical crust on near-surface soil pore structure after drying[J]. Catena, 2024, 238: e107880.
- [35] FU Y, LI G L, ZHENG T H, et al. Fragmentation of soil aggregates induced by secondary raindrop splash erosion[J]. Catena, 2020, 185: e104342.