

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220428.002.

闫钊全, 刘琦, 邓大鹏, 等. 短时强降雨对岩溶坡面土壤地表流失/地下漏失的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 77-82.

YAN Yiquan, LIU Qi, DENG Dapeng, et al. Effect of Short-Time Heavy Rainfall on Soil Surface Loss/Underground Leakage of Karst Slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 77-82.

短时强降雨对岩溶坡面土壤地表流失/地下漏失的影响

闫钊全¹, 刘琦^{1,2}, 邓大鹏¹, 廖启迪¹

(1. 同济大学 土木工程学院 地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092)

摘要:为研究岩溶地区雨强变化对水土地表流失和地下漏失的影响,对中国西南典型岩溶石漠化地区30年来的降雨特征进行了分析,并采用室内模拟试验,通过控制不同降雨时间和强度,研究其对土壤地表流失/地下漏失的影响。结果表明:(1)降雨强度与土壤地表流失量/地下漏失量均呈正比关系,但降雨强度的大小交替顺序对土壤地表流失/地下漏失量的影响存在差异,雨强大的降雨发生在降雨过程的后期更易发生土壤地下漏失。(2)短时多次降雨之间的时间间隔对土壤地表流失量和地下漏失量影响显著,集中性大雨比间断性大雨更易引发岩溶坡面土壤地表流失及地下漏失。短时多次降雨之间无雨的时间越长越不易发生水土流失和漏失。(3)降雨前期,降雨强度与土壤地表流失速率之间呈正相关关系,降雨中后期,土壤地表流失速率不受降雨强度的变化影响。降雨过程中,土壤地下漏失速率随着降雨强度的增大而升高。研究成果可为岩溶石漠化地区水土流失精准防治提供技术支撑。

关键词:岩溶石漠化;雨强交替;模拟试验;水土流失

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0077-06

Effect of Short-Time Heavy Rainfall on Soil Surface Loss/Underground Leakage of Karst Slope

YAN Yiquan¹, LIU Qi^{1,2}, DENG Dapeng¹, LIAO Qidi¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering,

Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to explore the influence of rainfall intensity changes in karst areas on surface water and soil loss and underground leakage, the rainfall characteristics of typical rocky desertification areas in the past 30 years were analyzed, and the influence of different rainfall intensities on soil surface loss/underground leakage was studied by using indoor rainfall simulation method. The results show that: (1) there was a positive correlation between rainfall intensity and soil surface loss/underground leakage, but the alternate order of rainfall intensity had an impact on soil surface loss/underground leakage; heavy rainfall was more likely to cause soil underground leakage at the late stage of rainfall process; (2) the time interval between short-term multiple rainfalls had a significant impact on soil surface loss and underground leakage; concentrated heavy rain was more likely to cause soil surface loss and underground leakage on karst slope than intermittent heavy rain; the longer the time of no rainfall between short-term multiple rainfalls was, the less soil erosion and leakage occurred; (3) in the early stage of rainfall, there was a positive correlation between rainfall intensity and soil surface loss rate; in the middle and late stages of rainfall, soil surface loss rate was not affected by the change of rainfall intensity; soil underground leakage rate increased with rainfall intensity during the

收稿日期:2021-09-10

修回日期:2021-11-19

资助项目:国家自然科学基金项目(41772292);同济大学第十五期实验教学改革资助项目

第一作者:闫钊全(1997—),男,河南南阳人,在读硕士,主要从事水文地质工程地质方面的研究。E-mail: yan360361883@qq.com

通信作者:刘琦(1980—),女,内蒙古包头人,博士,副研究员,主要从事水文地质工程地质方面的教学和科研。E-mail: liuqi472@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

whole rainfall process. These research results can provide technical support for accurate prevention and control of soil erosion in karst rocky desertification area.

Keywords: karst rocky desertification; rainfall intensity alternation; laboratory simulation; soil and water loss

中国西南岩溶地区具有独特的地表、地下二元水文地质结构,因此其水土流失存在特殊的地表流失和地下漏失两方面,贵州省人口密集和不合理的社会经济活动的影响,呈现出大面积岩溶石漠化现象^[1-3]。其中,贵州省石漠化面积约 37 597 km²,占中国石漠化总面积的 28.1%^[4-5]。影响西南岩溶地区水土流失和石漠化发展程度的诸多因素包括气候、地理地貌、地质条件和人类活动等^[6]。经多年研究成果可以看出,侵蚀性降雨是其中非常重要的影响因素之一。侵蚀性降雨是指能够造成真正意义土壤侵蚀的降雨^[7],且短时(1—3 小时)强降雨更易引发相关地质灾害发生^[8]。杜波等^[9]提出小雨量、短历时、大雨强的降雨是岩溶地区最易产流产沙的降雨类型,西南地区雨热同期,降雨时空分布不均,暴雨发生频率高、强度大,且大暴雨和特大暴雨所占比例高^[10-11]。这些自然因素都加剧了岩溶地区的水土流失。

目前国内外学者对岩溶地区水土流失机理的研究已有一定成果,研究方法主要有径流小区观测法,核素示踪法、3S 技术、室内模拟降雨试验法^[12-16],由于野外场地与研究方法的限制,室内试验法针对进一步研究水土流失的机理具有一定优越性,目前已有相关研究集中在基岩裸露率、地下孔隙度、坡面地貌特征、降雨强度等影响因子。雨量与土壤侵蚀联系密切,雨强是一个十分重要的降雨参数,有学者研究指出^[7,17],使用平均雨强对侵蚀性降雨进行定义,有一定的错选率,存在放大低强度降雨对土壤的侵蚀作用,而弱化了高强度降雨对土壤侵蚀的影响。在黄土地区存在总降雨量和土壤量相关性低的情况。目前还少有学者进行不同降雨强度交替作用下室内模拟降雨试验,因此本文基于贵州贞丰关岭—花江石漠化治理示范区的野外研究现状,通过模拟降雨强度交替组合方式探究自然界中降雨条件变化对表层岩溶坡面土壤地表流失与地下漏失的影响,该项研究对揭露岩溶地区水土流失的规律及防治石漠化具有理论和现实意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国贵州省关岭县与贞丰县相交处的北盘江峡谷花江地段,东经 105°36′30″—105°46′30″、北纬 25°39′13″—25°41′00″,示范区总面积 51.62 km²。多年平

均降雨量 1 100 mm,降水量时空分布不均。研究区岩性以碳酸盐岩为主。示范区石漠化面积 2 527.71 hm²,其中轻度石漠化面积 1 497.18 hm²,占 59.23%;中度—强度石漠化面积占比 40.77%。研究区内中度—强度石漠化较为常见,局部地区已经严重到威胁当地居民的生产生活^[18]。

1.2 研究区降雨特征

有学者通过研究确定了坡地土壤侵蚀主要由大雨量、中历时、大雨强的降雨造成^[19-20]。现对研究区所属贵州省安顺地区气象站 1991—2020 年连续 30 a 的逐日降雨数据进行分析,得出研究区共发生降雨 5 423 次。降雨量资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。按气象学的划分方法(24 小时降雨量)对研究区的降雨等级进行分级,即大暴雨($p \geq 100$ mm)、暴雨($50 \leq p < 100$ mm)、大雨($25 \leq p < 50$ mm)、中雨($10 \leq p < 25$ mm)、小雨($p < 10$ mm)进行分级。将 5 423 次降雨按照降雨量大小统计分析,得出研究区降雨特征见图 1。小雨共 4 394 次,占降雨总次数的 81%,累计降雨量 8 885 mm,占降雨总量的 23%;中雨共 609 次,占降雨总次数的 11%,累计降雨量 9 710 mm,占降雨总量的 25%;大雨共 281 次,占降雨总次数的 5.2%,累计降雨量 9 535 mm,占降雨总量的 24.7%;暴雨次数 120 次,占降雨总次数的 2.2%,累计降雨量 8 107.3 mm,占降雨总量的 21%;大暴雨次数 19 次,占降雨总次数的 0.6%,累计降雨量 2 392 mm,占降雨总量的 6.3%。

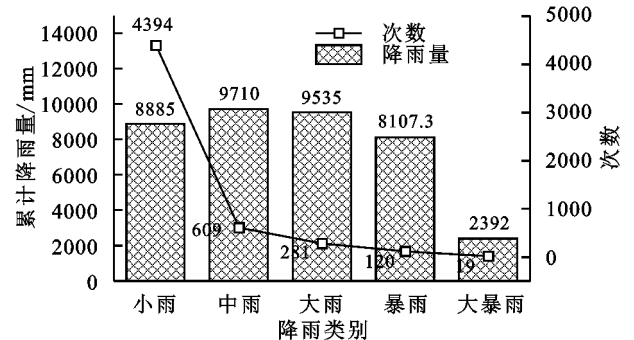


图 1 不同等级降雨总量及次数

通过对研究区 30 年的降雨特征分析得出:降雨等级按照发生频次排序为:小雨>中雨>大雨>暴雨>大暴雨;按照降雨量排序为:中雨>大雨>小雨>暴雨>大暴雨。暴雨及大暴雨主要集中在 4—10 月份,中雨、大雨、暴雨、大暴雨均呈现雨季降雨频次增加,旱季减少的情况。但这些降雨是否引起侵蚀

性降雨还需进一步验证。

为了进一步了解研究区的侵蚀性降雨特征,分析侵蚀性降雨对土壤地表流失/地下漏失的影响。本课题组在研究区选取典型坡面修建径流小区和气象站以获取数据。该气象站每 30 min 记录一次降雨量数据并自动储存,共统计了 2018 年 4 月至 2020 年 9 月的降雨数据,以每次降雨后径流小区是否产沙作为发生侵蚀性降雨的依据。随机选择研究区 2 h 降雨历时的 5 组侵蚀性降雨量数据分析(图 2),以该区 2019 年 5 月 26 日的降雨数据为例,其降雨强度瞬时最高可达 34.8 mm/h,但仅 0.5 h 过后降雨强度变为零,之后又开始降雨。可知研究区的降雨具有瞬时雨强大、降雨在时间上较为集中且不同雨强交替发生的特点。

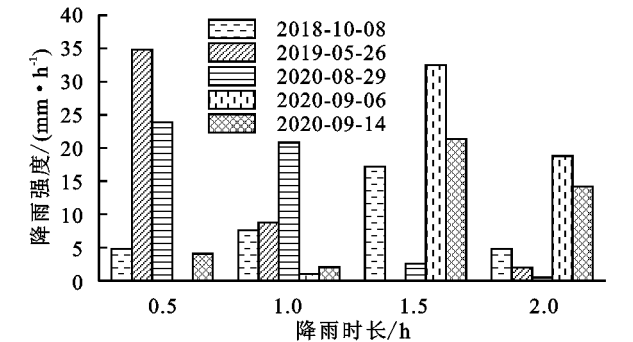


图 2 降雨强度随降雨时长变化

1.3 试验设备与材料

试验土壤样品采自示范区中碳酸盐岩风化形成的红黏土,该区土壤一般都很浅薄,但质地黏重、透水性差,易在降雨季节发生水土流失,其物理性质见表 1。进行试验前先对土壤进行筛分,去除石砾,配备成含水率 25% 的土壤均匀地铺在模型表面并压实,用以模拟示范区表层土。

表 1 试验土样物理性质

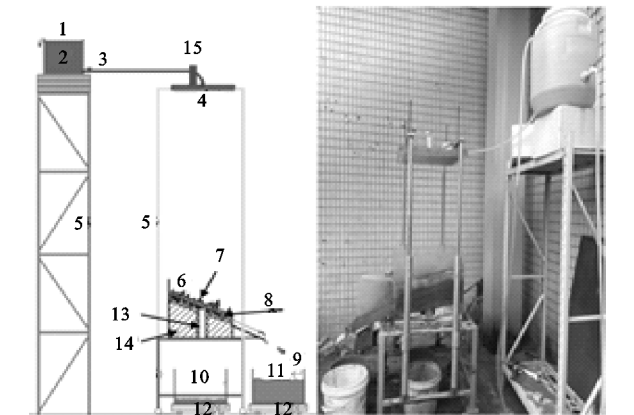
取样深度/cm	含水量/%	密度/(g·cm ⁻³)	液限%	塑限%	塑性指数%	天然孔隙比
10—15	10.9	1.31	54	36	18	1.165

试验设备为自制的表层岩溶裂隙带土壤地表流失和地下漏失模拟装置(图 3)^[21],试验设备主要由模型箱和降雨平台组成。模型箱中由切割成型的泡沫、承压铁板和承压铁板上的石灰岩石板和填充碎石组成,该部分用以模拟基岩,之后在基岩上铺设土壤和放置碎石充当土岩界面和裸露岩体。承压铁板上预留出一个长宽为 10 cm×2 cm 的开口,用以模拟野外裂隙。降雨模拟装置采用针头式降雨方式模拟降雨,降雨均匀系数大于 80%,降雨器高度为 2 m。降雨强度的变化范围 10 mm/h~120 mm/h,调节变化时间<15 s。

1.4 试验条件

依据熊康宁等^[22]及本课题组在示范区典型岩溶

坡面所建径流小区调查统计结果^[23],结合示范区野外调查可知示范区典型坡面的倾角范围为 10°~25°,基岩裸露率为 60%~85%,将本试验的坡度选取为 15°,基岩裸露率为 60%,选取 4 个降雨强度(10, 20, 40, 80 mm/h),试验每 0.5 h 变化一次降雨强度,共变化 4 次,一组试验持续 2 h。将选取的降雨强度换算为 24 h 降雨量,按照气象学中依靠降雨量区分降雨等级的方法区分本试验的降雨等级,故对本试验降雨强度的描述为:10 mm/h 的降雨为中雨,20 mm/h 的降雨为大雨,40 mm/h 的降雨为暴雨,80 mm/h 的降雨为大暴雨。降雨强度的设定根据所统计的示范区降雨特征及径流小区侵蚀性降雨特征选取,正式试验前先进行一组预试验标定降雨强度,将室内试验次降雨径流深情况与野外实际情况相比较,依据动力相似、产生径流量相似原则^[24]确定。试验开始后,每 5 分钟用采样瓶分别接满土壤地表流失与地下漏失泥水样,用烘干法测得每组数据的土壤地表流失和地下漏失量。本试验的试验条件设置可见表 2。



注:1:供水水龙头;2:稳压水箱;3:阀门;4:针孔式降雨器;5:支架;6:土壤层;7:地表碎石;8:石灰岩石板;9:采样瓶;10:水土地下漏失;11:水土地表流失;12:电子秤;13:岩溶裂隙;14:泡沫填充物。

图 3 表层岩溶裂隙带水土地表流失和地下漏失模拟装置

2 结果与分析

2.1 两种不同降雨强度交替作用下对土壤地表流失/地下漏失的影响

降雨是发生土壤地表流失/地下漏失的重要驱动力,分析两种不同降雨强度交替作用下土壤地表流失、地下漏失的特征(图 4),可知在此试验条件下土壤地下漏失占土壤侵蚀总量的 63%~91%,平均占比为 80%,6 组试验均呈现出土壤地下漏失占土壤侵蚀主导地位的现象。组合 1 土壤地下漏失占土壤侵蚀总量的 85%,土壤地下漏失总量约为其他降雨强度交替作用情况下的 1.7~2.4 倍,相比于其他降雨强度交替作用的情况更容易发生土壤地下漏失。组

合 6 的土壤地表流失占土壤侵蚀总量的 37%，土壤地表流失总量约为其他降雨强度交替作用情况下的 1.4~4.4 倍。在降雨量一定的情况下，组合 6 有最高的土壤地表流失量，而地下漏失量为同组最低。

表 2 试验条件	
试验条件	试验设置
斜坡倾角	15°
基岩裸露率	60%
土壤厚度(cm)	10
降雨强度(mm/h)	10(中雨),20(大雨),40(暴雨),80(大暴雨)
历时各 30 min 的 降雨强度交 替作用方式	组合 1 10+10+20+20 mm/h
	组合 2 10+20+10+20 mm/h
	组合 3 10+20+20+10 mm/h
	组合 4 20+10+10+20 mm/h
	组合 5 20+10+20+10 mm/h
	组合 6 20+20+10+10 mm/h
	组合 7 10+20+20+40 mm/h
	组合 8 10+20+40+20 mm/h
	组合 9 10+20+40+80 mm/h
	组合 10 80+40+20+10 mm/h
	组合 11 10+0+10+0 mm/h
	组合 12 10+0+0+10 mm/h

组合 1、组合 3、组合 6 均设置连续降大雨 1 h，这 3 个组合的土壤地表流失量分别为 1.97 g、1.82 g、2.83 g，土壤地表流失量高于其它间断性降大雨的 3 组。结果表明在总降雨量相同的情况下，高降雨强度下的集中降雨更容易导致土壤地表流失的发生。土壤地表流失的发生常常伴随着坡面径流的形成，高降雨强度集中降雨雨水多转化为土壤水，更容易改变土体结构，快速形成坡面径流，发生坡面径流携沙流失的现象。组合 2、组合 4、组合 5 即间断性降大雨的情况中土壤地表流失量小于其它 3 种组合，土壤地下漏失量差异不大，结果表明在总降雨量相同情况中，间断性大雨的不同组合下土壤地下漏量对降雨交替作用的变化响应不敏感。

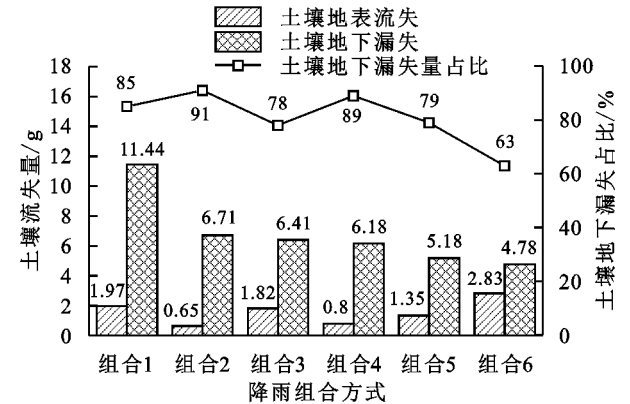


图 4 两种降雨强度交替作用下土壤地表流失/地下漏失特征

2.2 多种不同降雨强度交替作用下对土壤地表流失/地下漏失的影响

分析多种降雨强度交替作用下土壤地表流失、地下漏失总量的特征(图 5)可知,在这 6 种组合情况下,总降雨量相同,土壤地下漏失占土壤侵蚀总量的 56%~92%,平均占比为 82%,土壤地下漏失仍然为土壤侵蚀的主要形式。降雨量与土壤侵蚀呈正相关关系,按大暴雨、暴雨、大雨、小雨组合下的组合 9,组合 10 具有同组最大的土壤地表流失/地下漏失总量,分别为 22.75 g、28.07 g。在组合 9 和组合 10 中,组合 10 具有最高的土壤地表流失量和土壤地下漏失量。在降雨前期,岩溶坡面的土壤经历的短历时大暴雨会快速导致土壤水饱和,降雨强度大于土壤水入渗率,形成地表径流通道和地下漏失通道,之后降雨强度降低但已经形成的土壤侵蚀通道依然存在,降雨难以转化为土壤水,通过已形成的土壤侵蚀通道携带土壤侵蚀。

组合 11 和组合 12 模拟了间断性降中雨的情况,在这种情况下土壤地表流失、土壤地下漏失量均较小,两种组合土壤地表流失/地下漏失总量为 6.93 g、5.46 g,土壤地表流失量较小,土壤地表流失量占比仅为 8%,土壤地下漏失占比 92%。土壤地下漏量对降雨强度交替作用的变化响应不敏感。间断性降中雨,降雨强度不能导致土壤水饱和,雨水入渗土壤较为充分,沿着已有的漏失通道,携带土壤漏失。由于雨水大部分入渗土壤,未能形成坡面径流,土壤地表流失量较小。

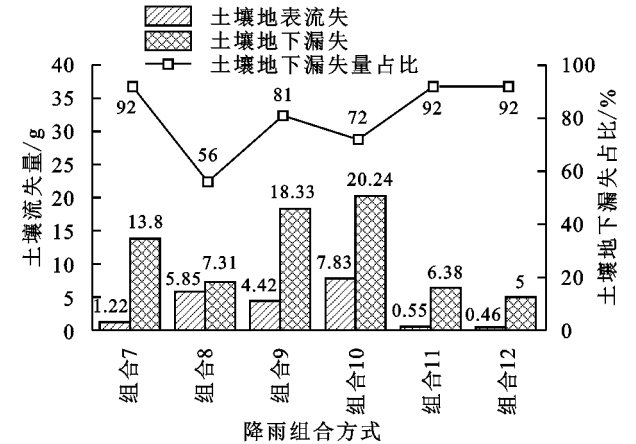


图 5 不同降雨强度作用下土壤地表流失/地下漏失特征

2.3 不同降雨强度下土壤地表流失/地下漏失对时间的响应

分析不同降雨强度交替作用下土壤地表流失量随时间的变化特征(图 6)可知,在降雨全过程中存在土壤地表流失量和降雨强度呈正比的关系。稳态降雨的情况下,随着降雨强度的增高,土壤地表流失量依次为 2.12 g、2.37 g、4.83 g、5.92 g,且土壤地表流失速率较为稳定。

组合 9、组合 10 的土壤地表流失特征不同,组合 9 降雨全过程土壤地表流失量为 4.42 g,在大暴雨降雨时段里,土壤地表流失量为 1.92 g,占比 43%,组合 10 降雨全过程土壤地表流失量为 7.83 g,在大暴雨降雨时段里,土壤地表流失量为 3.55 g,占比 45%。可以发现,30 min 后不同降雨强度下土壤地下漏失速率较为稳定,前 30 min 的不同降雨强度中土壤漏失速率差异较大,基本呈现土壤漏失速率随降雨强度增大而增大的现象。在土壤水暂未饱和的情况下,较高的降雨强度使得土壤水快速饱和,继续降雨,土壤水难以继续入渗,在表层岩溶坡面形成土壤地表径流,雨水沿着径流通道携带土壤,造成稳态的土壤地表流失,即在图表中体现为高降雨强度具有更高的地表流失初值,之后不同降雨组合的土壤地表流失速率处于稳定状态。组合 9 降雨情况下的总土壤地表流失量大于稳态大雨,小于稳态暴雨情况中的土壤地表流失。而在 90 分钟以后,降雨强度增大到大暴雨以后,土壤地表流失速率显著增大,土壤随着形成的坡面径流通道发生流失,组合 10 后期降雨强度减小,但已经形成的坡面径流通道并未消失,土壤地表流失速率仍维持在相对稳定的水平。

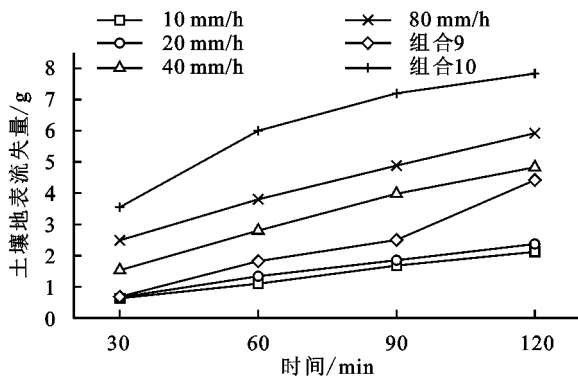


图 6 不同降雨强度下土壤地表流失量特征

分析不同降雨强度交替下土壤地下漏失量随时间的变化特征(图 7)可知,总体上稳态降雨情况下不同降雨强度的土壤地下漏失量波动不大,在降雨全过程中土壤地下漏失量和降雨强度呈正相关。稳态降雨的情况下,随着降雨强度增大土壤地下漏失量依次为 1.64 g, 4.15 g, 5.68 g, 21.35 g。4 组稳态降雨的情况中,除大暴雨的情况下,土壤地下漏失速率相对较稳定。

组合 9、组合 10 具有不同的土壤地下漏失特征,土壤地下漏失量分别为 18.33 g, 20.24 g, 组合 9 随着降雨强度的升高具有越来越大的地下漏失速率,不同降雨阶段下,组合 9 的地下漏失量均小于 80 mm/h 降雨强度下的稳态降雨。从总降雨量来考虑,组合 9 的降雨量为 75 mm, 40 mm/h 下稳态降雨两小时降雨量为 80 mm,两组的总降雨量之间相差不大,但组合 9 降雨情况下最后 30 min 内,降雨强度增大为之

前的 2 倍,加速了坡面的土壤地表流失/地下漏失能力,分析其原因在大暴雨气候条件下,降雨强度超过一定临界值之后,雨水入渗速率加快,土壤含水率急速增加,土体结构发生改变,更容易形成裂隙流进而加速土壤地下漏失。组合 10 在降雨初期 30 min 内,相比于其他降雨情况具有最大的土壤地下漏失量 11.08 g,之后随着降雨强度的减小,土壤地下漏失速率也在减小,并在 60 min 之后土壤地下漏失速率小于 80 mm/h 的稳态降雨,终态情况下土壤地下漏失量小于 80 mm/h 的稳态降雨,表明土壤地下漏失量与降雨总量呈正比。

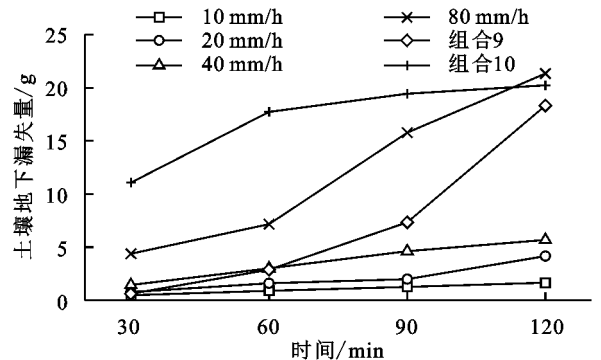


图 7 不同降雨强度下土壤地下漏失量特征

3 结论

(1) 降雨强度与土壤地表流失量/地下漏失量均呈正比关系,但降雨强度的大小交替顺序对其影响存在差异。大雨和中雨组成的 6 种强度交替降雨情况下,先集中性中雨再集中性大雨产生的土壤地表流失和地下漏失总量最大;先集中性大雨再集中性中雨产生的土壤地表流失量最大,而土壤地下漏失量最小。考虑大暴雨、暴雨、大雨、中雨这 4 种雨强情况下,按雨强从大到小实施所产生的土壤地表流失和地下漏失总量大于雨强从小到大实施的情况。雨强大的降雨发生在降雨过程的后期更易发生土壤地下漏失。

(2) 短时多次降雨之间的时间间隔对土壤地表流失量和地下漏失量影响显著,集中性大雨比间断性大雨更易引发岩溶坡面土壤地表流失及地下漏失。短时多次降雨之间无雨的时间越长越不易发生水土流失和漏失,间断性强度低的降雨对土壤地表流失和地下漏失的影响远小于高强度集中降雨。要注意间断性中雨对土壤地下漏失的防控。

(3) 降雨强度与时长对土壤地表流失/地下漏失的速率也有影响。降雨前期,土壤地表流失速率与降雨强度呈正相关关系,在降雨中后期其速率不受降雨强度的变化影响;在整个降雨过程中,土壤地下漏失速率均与降雨强度呈正相关关系。因此,在应对短时强降雨极端天气时应该着重加强降雨初期的水土流失/漏失灾害防治。

参考文献:

- [1] 卢耀如.岩溶水文地质环境演化与工程效应研究[M].北京:科学出版社,1999.
- [2] Zhou J, Tang Y Q, Zhang X H, et al. The influence of water content on soil erosion in the desertification area of Guizhou, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2012, 27(2):185-192.
- [3] Bai Y E, Liu Q, Gu Z F, et al. The dissolution mechanism and karst development of carbonate rocks in karst rocky desertification area of Zhenfeng-Guanling-Huajiang County, Guizhou, China [J]. Carbonates & Evaporites, 2019, 34:45-51.
- [4] 王世杰.喀斯特石漠化:中国西南最严重的生态地质环境问题[J].矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2):120-126.
- [5] Ying B, Xiao S Z, Xiong K N, et al. Comparative studies of the distribution characteristics of rocky desertification and land use/land cover classes in typical areas of Guizhou province, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(2):631-645.
- [6] 蒋忠诚,李先琨,胡宝清,等.广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究[M].北京:科学出版社,2011.
- [7] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报, 2000, 14(4):6-11.
- [8] 付超.江西暖季短时强降水特征及湖泊效应分析[D].成都信息工程大学, 2019.
- [9] 杜波,唐丽霞,潘佑静,等.贵州喀斯特地区侵蚀性次降雨产流产沙特征研究[J].西南林业大学学报, 2016, 36(5):111-117.
- [10] 伍红雨,王谦谦.近49年贵州降水异常的气候特征分析[J].高原气象, 2003, 22(1):65-70.
- [11] 郭渠,陈佳,李瑞,等.重庆地区短历时强降水气候特征[J].干旱气象, 2018, 36(6):944-953.
- [12] 白占国,万国江.滇西和黔中表土中⁷Be与¹³⁷Cs分布特征对比研究[J].地理科学, 2002, 22(1):43-48.
- [13] 曾凌云,汪美华,李春梅.基于RUSLE的贵州省红枫湖流域土壤侵蚀时空变化特征[J].水文地质工程地质, 2011, 38(2):113-118.
- [14] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报, 2012, 67(7):878-888.
- [15] Wei X P, Yan Y, Xie D, et al. The soil leakage ratio in the Mudu watershed, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8):721-732.
- [16] Yan Y J, Dai Q H, Yuan Y F, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J]. Geoderma, 2018, 330:30-40.
- [17] 王万忠,焦菊英,郝小品.中国降雨侵蚀力R值的计算与分布(Ⅱ)[J].水土保持学报, 1996, 2(1):29-39.
- [18] 刘琦,白友恩,顾展飞,等.石漠化地区石灰岩和白云岩的溶蚀—蠕变特性试验研究:以贵州贞丰—关岭花江岩溶区为例[J].桂林理工大学学报, 2017, 37(3):399-404.
- [19] 郑海金,杨洁,左长清,等.红壤坡地侵蚀性降雨及降雨动能分析[J].水土保持研究, 2009, 16(3):30-33.
- [20] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. Catena, 2012, 90(1):53-62.
- [21] 刘琦,王涵,廖启迪,邓大鹏,姚邦杰.一种表层岩溶裂隙带土壤地表流失和地下漏失模拟装置[P].上海:CN112611850A2021-04-06.
- [22] 熊康宁,黎平,周忠发.喀斯特石漠化的遥感:GIS典型研究[M].北京:地质出版社,2002.
- [23] 任标.基于“三水”循环的石漠化地区土壤地表流失机理研究[D].上海:同济大学,2020.
- [24] 孙三祥,张云霞.降雨及坡面径流模拟试验相似准则[J].农业工程学报, 2012, 28(11):93-98.

(上接第76页)

- [14] Bottinelli N, Zhou H, Capowiez Y, et al. Earthworm burrowing activity of two non-Lumbricidae earthworm species incubated in soils with contrasting organic carbon content (Vertisol vs. Ultisol)[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(8):951-955.
- [15] Lv M R, Fu S L, Shao Y H, et al. Earthworm pontoscolex corethrurus stimulated soil CO₂ emission by enhancing substrate availability rather than changing microbiota community structure[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717:137227.
- [16] 张池,周波,吴家龙,等.蚯蚓在我国南方土壤修复中的应用[J].生物多样性, 2018, 26(10):1091-1102.
- [17] 贺慧,郑华斌,刘建霞,等.蚯蚓对土壤碳氮循环的影响及其作用机理研究进展[J].中国农学通报, 2014, 30(33):130-136.
- [18] Van Groenigen J W, Van Groenigen K J, Koopmans G F, et al. How fertile are earthworm casts? A meta-analysis[J]. Geoderma, 2019, 338:525-535.
- [19] 王霞,李辉信,朱玲,等.蚯蚓活动对土壤氮素矿化的影响[J].土壤学报, 2008, 45(4):641-648.
- [20] Le Bayon RC, Binet F. Earthworms change the distribution and availability of phosphorous in organic substrates[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(2):235-246.
- [21] 李辉信,胡锋,焦加国.蚯蚓对农田土壤质量的影响[C].江苏耕地质量建设论文集, 2008:15-19.