

闫钊全, 刘琦, 邓大鹏, 等. 表层岩溶裂隙带土壤地表流失/地下漏失室内模拟实验[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 240-248.
DOI: 10.11932/karst20220206

表层岩溶裂隙带土壤地表流失/地下漏失室内模拟实验

闫钊全^{1,2}, 刘琦^{1,2}, 邓大鹏^{1,2}, 王涵^{1,2}

(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:以表层岩溶裂隙带为研究对象,采用室内模拟降雨的方法,通过控制降雨强度、坡度、裂隙宽度、裂隙产状,研究其对土壤地表流失、地下漏失的影响。结果表明:(1)土壤地表流失主要受降雨强度和坡度的影响,土壤地表流失量随降雨强度的增大而增大、随坡度的增大而增大,30°坡面土壤地表流失量最高。(2)土壤地下漏失主要受裂隙宽度、产状和坡度的影响,对降雨强度的响应不明显;土壤地下漏失量与裂隙宽度大小呈正相关关系,裂隙走向与坡面走向呈30°时最容易发生土壤地下漏失;坡度与土壤地下漏失的发生呈负相关关系;伴随降雨,土壤地下漏失速率变化幅度较大,漏失速率先增加后减小直至停止。无落水洞、漏斗等管道的岩溶坡面土壤流失的主要形式是地表流失,而土壤地下漏失的主要通道是落水洞、漏斗等大型岩溶管道,土壤地下漏失对土壤流失的总贡献率小于5%。

关键词:岩溶;模拟实验;土壤地表流失;土壤地下漏失

中图分类号: S157 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)02-0240-09 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

以贵州为中心的西南岩溶地区是中国岩溶发育分布最集中的地区^[1],该地区严重的水土流失问题导致基岩大面积裸露,形成石漠化问题,严重制约着区域经济的可持续发展,是该地区居民贫困落后的主要根源^[2-5]。

岩溶地区由于其特有的水文地质二元结构^[6-7],其水土流失不仅存在地表流失,还存在地下漏失^[8]。岩溶地区地表土壤总量少,土壤与岩石之间的亲和力和黏着力差^[9-10],其山高坡陡地貌的特征为土壤流失提供了动力潜能^[11]。而降雨是水土流失的主要驱

动力^[12-13]。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^[14]。这些自然因素都加剧了岩溶地区的水土流失。

诸多学者都对岩溶地区的水土流失进行了大量研究^[15-16],研究方法主要有径流小区法^[17]、核素示踪法^[18-19]、USLE及其改进模型(RUSLE)法^[20]、3S技术^[21]等。由于野外条件与研究方法的限制,现阶段土壤地下漏失研究以定性为主,定量研究较少。而通过室内人工模拟降雨实验,可有效解决野外实验的局限性,便于观测研究土壤侵蚀的发生演变过程及其各个因素之间的内在机制。一些学者研究模拟降雨

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772292); 国家重点研发计划(2016YFC0502603)

第一作者简介: 闫钊全(1997—),男,硕士研究生,主要从事水文地质工程地质方面的研究。

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

收稿日期: 2021-02-25

条件下的岩溶地区土壤侵蚀,认为降雨强度、基岩裸露率和地下裂(孔)隙度是影响岩溶地区边坡土壤侵蚀过程的重要因素^[22-23]。随着岩石裸露率的增加,地表平均产沙率和地下平均产沙率均呈现出先增加后减少的变化趋势。石漠化程度的加剧将增加地表产沙的临界条件^[24]。在一定条件下,地下裂(孔)隙度与地表产沙量呈负线性相关,与地下产沙量呈正线性相关^[25]。这些研究从降雨强度、基岩裸露率、裂(孔)隙度等方面分析其对岩溶地区土壤侵蚀的影响,但鲜有人对降雨时长以及裂隙产状、宽度对岩溶地区土壤侵蚀的影响进行深入研究。岩溶地区的降雨有瞬时雨强大而持续时间较短的特点,前人研究只关注降雨强度以及降雨量两个指标,土壤流失速率随降雨时长的变化被忽略。另外,裂隙的产状、宽度也是影响地下漏失的重要因素。

因此,本文利用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,在室内人工模拟不同降雨强度、坡度、裂隙宽度、裂隙产状四个影响因素,

探究降雨对表层岩溶裂隙带中土壤地表流失与地下漏失的影响,揭露岩溶地区水土流失的规律,以期为控制岩溶地区水土流失和保护生态环境提供科学参考。

1 研究区概况

研究区位于中国贵州省安顺市关岭县与黔西南自治州贞丰县交界处的北盘江峡谷花江段(图1),东经 $105^{\circ}36'30''\sim 105^{\circ}46'30''$ 、北纬 $25^{\circ}39'13''\sim 25^{\circ}41'00''$,总面积为 51.62 km^2 。其石漠化主要发生在较纯的碳酸盐岩区,以中度、强度石漠化为主;区内碳酸盐岩占95%以上,碳酸盐岩层的总厚度在700 m左右,质纯层厚。研究区两岸海拔相差悬殊,在370~1355 m之间,是贵州高原上一个典型的岩溶高原峡谷区域。该区气候属于亚热带季风气候,年平均气温为 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量为 1409.1 mm ,降水量时空分布不均,无霜期有339 d^[26]。

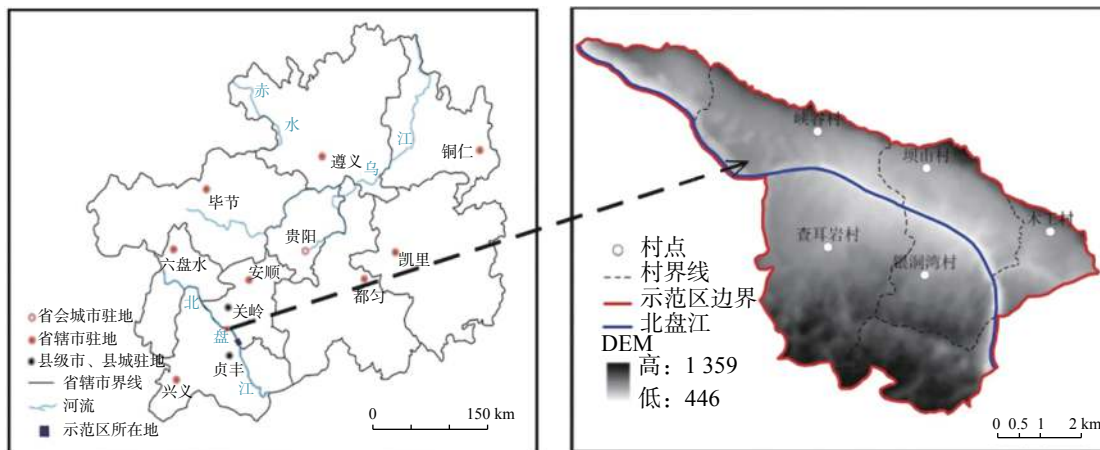


图1 研究区地理位置分布图

Fig. 1 Location map of the study area

2 研究方法

2.1 实验设备与材料

实验土壤样品采自示范区中碳酸盐岩风化形成的红黏土,其物理性质见表1。贞丰—关岭花江示范

区内土壤浅薄,质地黏重、透水性差,易在降雨季节发生水土流失。

实验利用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^[27],该设备主要由模型箱和降雨器组成。模型箱尺寸大小为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$,

表1 实验土样物理性质

Table 1 Physical properties of soil samples

取样深度/cm	含水量/%	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	天然孔隙比
10~15	10.9	1.31	54	36	18	1.165

将高密度泡沫内部切割出不同的裂隙构成岩溶斜坡基座来模拟表层岩溶裂隙带。降雨器是由有机玻璃制作的一个板状箱体,采用针头式降雨方式,高度为

2 m,大小为 50 cm×50 cm,降雨均匀系数大于 80%,降雨强度的变化范围为 10~120 mm·h⁻¹,调节变化时间<15 s(图 2)。

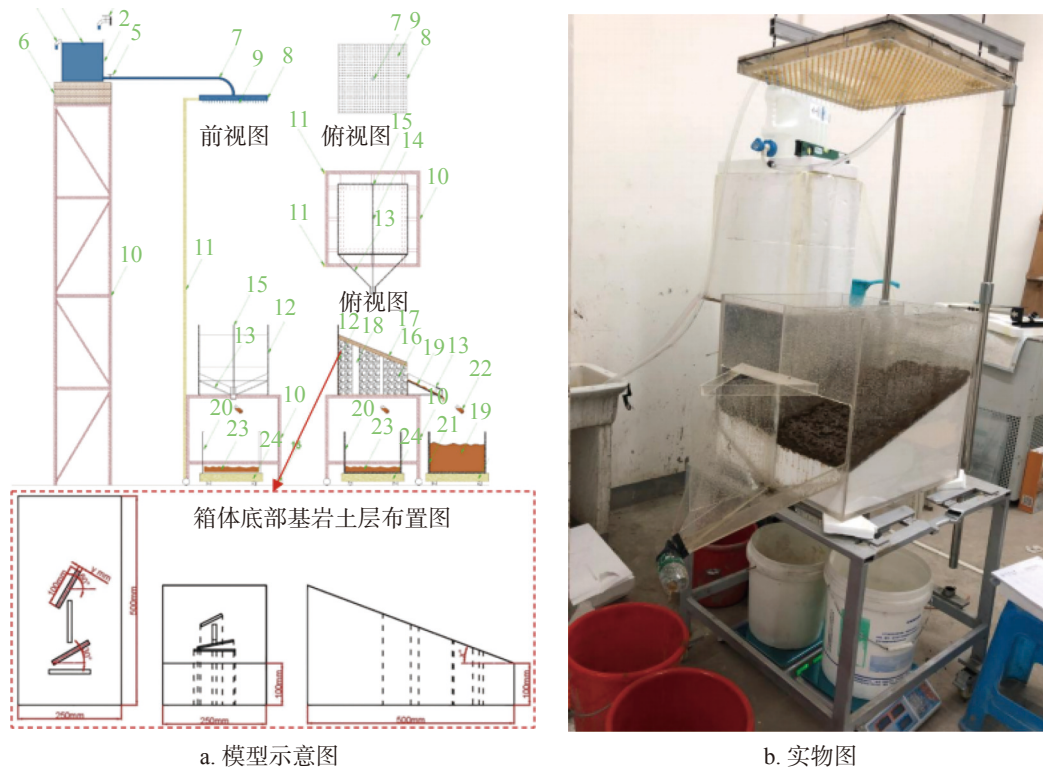


图 2 土壤流失室内模拟装置模型图

Fig. 2 Model diagram of indoor simulation device of soil loss

2.2 实验方法

本实验模拟在不同降雨时长与强度下,坡度、裂隙宽度、裂隙走向对表层岩溶裂隙带中土壤地表流失与地下漏失的影响。依据在研究区野外调查结果及文献资料研究的基础,将本实验的实验条件设置如表 2。

表 2 实验条件的设置

Table 2 Test conditions

实验条件	实验设置
坡度/°	5、10、20、30
降雨强度/mm·h ⁻¹	40、60、80
裂隙宽度/mm	5、10、20
裂隙走向/°	0、30、60、90

实验开始前将晒干的土壤按照 10% 的含水率要求与水进行配比,均匀铺在模型表面并压实,土层厚 3 cm,裂隙长度 10 cm。控制供水箱内供水压强,调整降雨量的大小,使用流量计进行降雨量测

量。待降雨稳定后,掀开模型上方的塑料布,并开始计时。模型设备下方设置有地下漏失、地表流失收集盒,并置于电子秤之上。实验开始后,每 4 min 记录一次 4 个电子秤的读数,并用采样瓶分别接满土壤地表流失与地下漏失的泥水样,等待后续分析测试。整个降雨过程持续 100 min,采集 25 组泥水样。实验结束后,用过滤烘干法测得每组样品中的土壤重量。

3 结果与讨论

3.1 不同因素对土壤地表流失的影响

3.1.1 坡度对土壤地表流失的影响

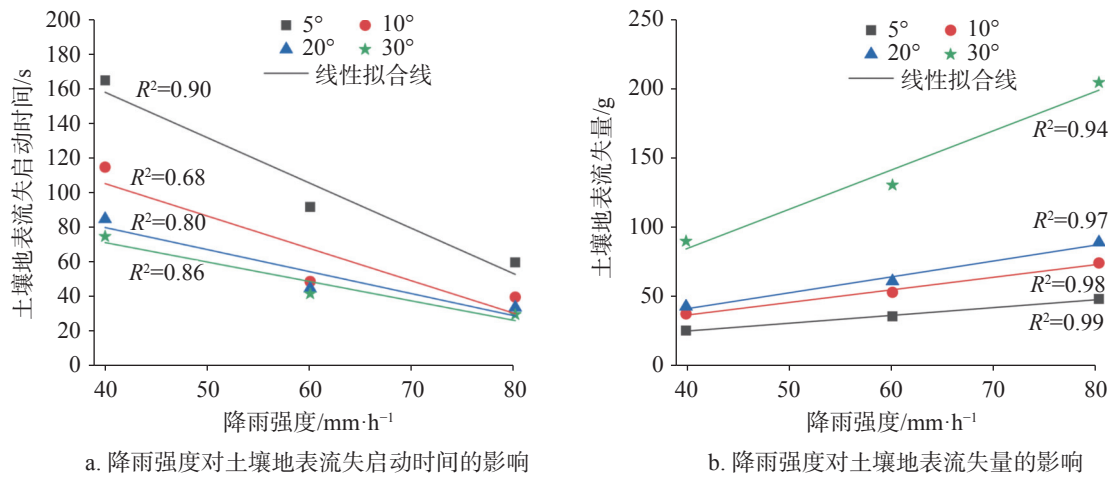
实验设置降雨历时为 100 min,裂隙宽度 5 mm,裂隙走向 90°时,不同坡度情况下,土壤地表流失具有以下特征:地表流失启动时间与坡度之间呈现负相关性,土壤地表流失量与坡度之间呈现正相关性;

不同降雨强度下,坡度为 10°、20°时平均土壤地表流失量之差为 9.4 g, 20°、30°时平均土壤地表流失量之差为 77.3 g。相同降雨强度下坡度增加 10°, 土壤流失效率提高约 8 倍(图 3)。这说明坡度在 20°以内时土壤地表流失处于可控阶段,坡度大于 30°时,地表土壤剧烈流失,甚至会产生土体滑坡的现象。结合研究区野外考察发现,当坡度大于 30°时,地表土壤较为浅薄,植被覆盖率显著降低,植被只能依靠岩石裂隙中的土壤存活,岩溶坡地的土壤地表流失主要

发生在 30°以内的缓坡度情况下,进行土壤地表流失防治应注重对大面积缓坡度地区的防治。

3.1.2 降雨时长与强度对土壤地表流失的影响

实验研究降雨强度对土壤地表流失启动时间、土壤地表流失量的影响,由图 3 所示可知,降雨强度与土壤地表流失启动时间之间呈负相关关系,降雨强度与土壤地表流失量之间呈现显著的正相关性,由图 3b 可知其拟合度大于 0.9。



a. 降雨强度对土壤地表流失启动时间的影响

b. 降雨强度对土壤地表流失量的影响

图 3 降雨强度和坡度对土壤地表流失的影响

Fig. 3 Effect of rainfall intensity and slope gradient on soil surface loss

不同降雨强度和坡度情况下(表 3),实验结果显示土壤地表流失速率变化过程可分为 3 个阶段(图 4):第 1 阶段为降雨开始 0~40 min,土壤地表流失速率不断增大,坡面土壤受到雨滴溅蚀(图 5A,图 5B)。不同降雨强度情况下,地表土壤流失速率均在降雨 40 min 左右达到峰值。40 mm·h⁻¹降雨强度下,最大地表土壤流失速率为 0.49 g·min⁻¹;80 mm·h⁻¹降雨强度下,最大地表土壤流失速率为 0.89 g·min⁻¹,增大侵蚀性降雨强度,土壤流失效率提高约 1.8 倍。第 2 阶段为降雨 40~90 min 时,土壤地表流失速率

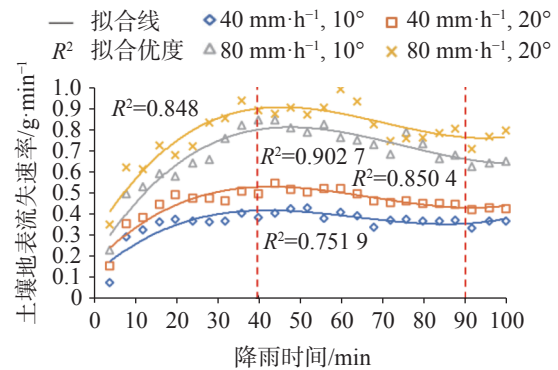


图 4 降雨时长与土壤地表流失速率的关系

Fig. 4 Relationship between the rate of soil surface loss and rainfall duration

表 3 不同降雨强度和坡度情况下的实验条件

Table 3 Test conditions under different rainfall intensities and slopes

实验条件	实验设置
坡度/°	10、20
降雨强度/mm·h ⁻¹	40、80
裂隙宽度/mm	5
裂隙走向/°	90

随降雨时间的推移而缓慢变小。第 3 阶段为降雨 90 min 之后,这一阶段土壤地表流失速率逐渐稳定,降雨侵蚀以细沟侵蚀为主。稳定后的土壤地表流失速率约为土壤流失速率峰值的 80%(图 5D)。本实验研究中土壤地表流失速率会随降雨强度的增大而增大,这与野外径流小区次降雨后坡面土壤流失特

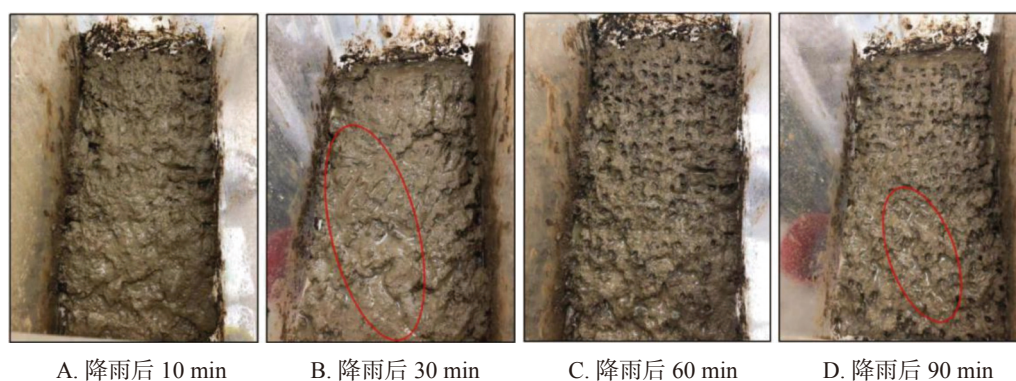


图5 降雨时长对地表流失的影响
(降雨强度 $80 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 裂隙宽度 5 cm, 裂隙走向与坡面走向成 90°)

Fig. 5 Effect of the rainfall duration on soil surface loss
(rainfall intensity: $80 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$; fissure width: 5 cm; fissure direction to slope direction: 90°)

征相似^[28]。

3.2 不同因素对水土地下漏失的影响

3.2.1 裂隙宽度、坡度对水土地下漏失的影响

裂隙宽度是影响水土地下漏失量的重要因素。实验设置降雨历时 100 min, 降雨强度 $80 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。由图 6 可知, 土壤地下漏失量与裂隙宽度的变化呈正

相关性, 而坡度越大, 土壤地下漏失越难发生, 二者呈正相关性。实验条件为降雨强度 $80 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、裂隙宽度 5 mm、坡度 10° 时土壤地表流失的启动时间为 40 s, 土壤地下漏失启动时间为 270 s。坡度为 20° 时土壤地表流失的启动时间为 34 s, 土壤地下漏失启动时间为 363 s。对比分析发现, 坡度越小, 裂隙越宽, 土壤地下漏失启动时间越早, 结束时间越晚, 地下漏失水量与土壤量越大。

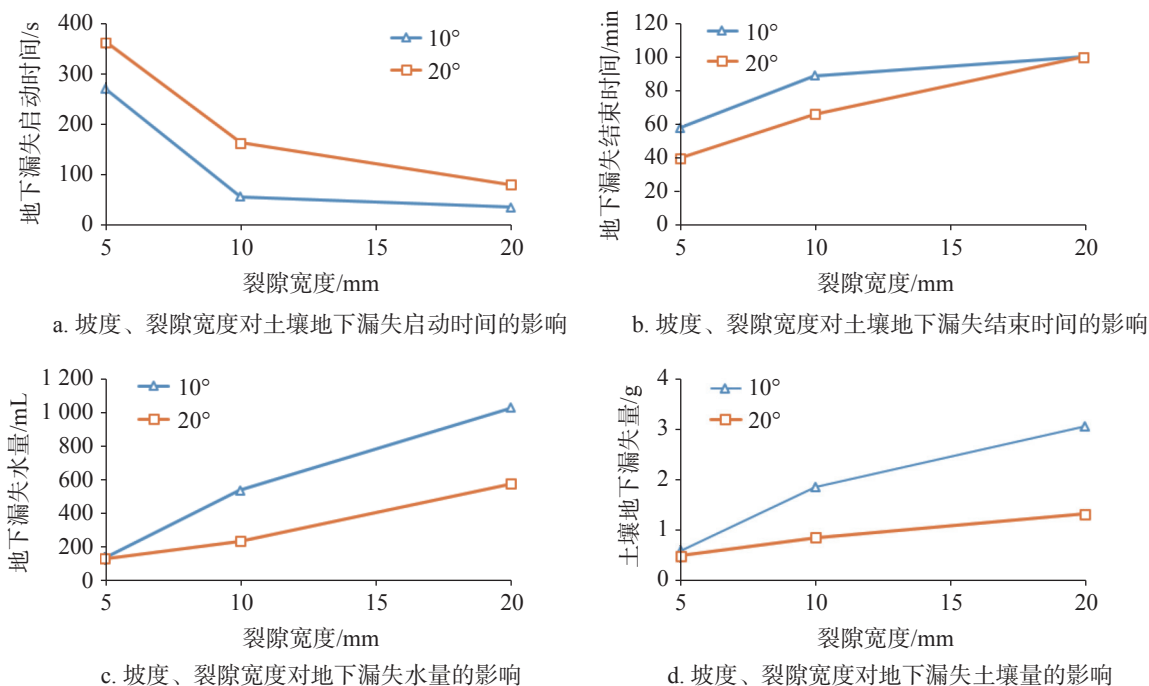


图6 裂隙宽度、坡度对水土地下漏失的影响

Fig. 6 Effects of fissure width and slope gradient on underground leakage of water and soil

岩溶地区土壤流失过程与机理被广泛关注, 其中关于土壤裂隙漏失率的问题仍然存在分歧。有学

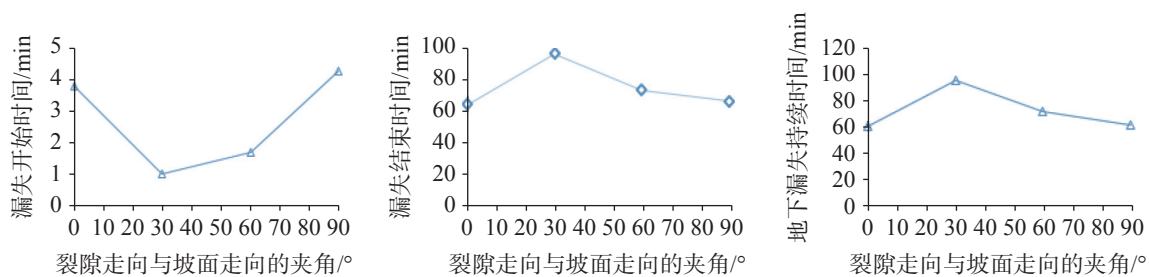
者认为土壤地下漏失是形成石质坡地的主要原因, 通过裂(孔)隙土壤漏失率比较高^[29]。也有学者认为

在流域尺度,通过这种途径的流失量是较小的,地表土壤难以通过裂隙垂直渗漏到达土石界面,绝大部分的泥沙主要通过短距离的坡面运移从低洼处的落水洞、漏斗进入地下暗河系统^[30]。本实验所模拟表层岩溶带非管道型岩溶裂隙(非落水洞、漏斗等大型管道型岩溶裂隙),其结果显示土壤地表流失量(>95%)均大大高于地下漏失量(<5%),也就是地表流失仍是岩溶地区最主要的土壤流失方式,土壤地下漏失率较低。

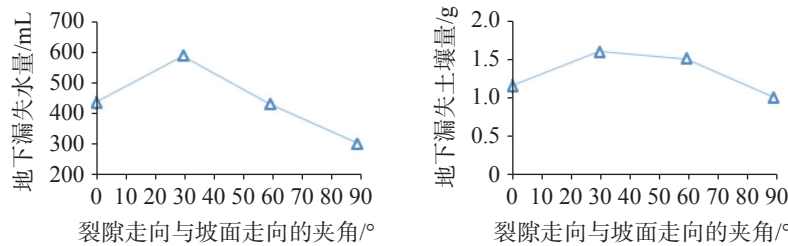
3.2.2 裂隙产状对水土地下漏失的影响

针对裂隙走向因素的实验研究结果表明,土壤地下漏失的启动时间随裂隙—坡面走向夹角的变化为 $30^\circ < 60^\circ < 0^\circ < 90^\circ$;土壤地下漏失结束时间随裂隙—坡面走向夹角的变化为 $30^\circ > 60^\circ > 90^\circ > 0^\circ$;

裂隙走向对单位时间地下漏失水量的影响关系为 $30^\circ > 0^\circ > 60^\circ > 90^\circ$,地下漏失土壤量随裂隙—坡面走向夹角的变化为 $30^\circ > 60^\circ > 0^\circ > 90^\circ$ (图7)。从以上3个指标上来看,裂隙走向与坡面走向呈 30° 时最容易发生地下漏失,且地下漏失的水土量最大,持续时间最长。裂隙走向与坡面走向呈 90° 时最不易发生地下漏失,且地下漏失的量最小,持续时间最短。裂隙与斜坡倾向垂直面上投影宽度大小具有相同的大小关系。上述结果表明:在岩溶地下裂隙较为发育的地区土壤的地下漏失越容易发生,该区域较难赋存土壤且植物覆盖率较低,而另一方面由于表层岩溶带地下裂隙的存在,使该裂隙管道中富集大量土壤,裂隙土从而可以提供植物生境。今后应加强裂隙特征对土壤地下漏失、土颗粒搬运距离及特点影响的研究。



a. 裂隙走向对水土地下漏失启动—结束时间的影响



b. 裂隙走向对地下漏失水量的影响

c. 裂隙走向对地下漏失土壤量的影响

图7 裂隙走向对水土地下漏失的影响

Fig. 7 Effect of fissure direction on underground leakage of water and soil

3.2.3 降雨时长与强度对土壤地下漏失速率的影响

实验表明土壤地下漏失速率随降雨时长的变化大致可分为2个阶段(图8):第1阶段为降雨开始后0~20 min,这一阶段土壤地下漏失速率不断增大直到峰值,裂隙宽度10 mm、坡度 10° 时具有最大土壤地下漏失速率,为 $37.9 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$;第2阶段为降雨20 min之后,这一阶段土壤地下漏失速率开始显著下降,至稳定状态时土壤地下漏失速率为 $0 \sim 5.3 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$,约为峰值的14%。本实验观察到土壤地下漏失速率会

随着降雨时长增加而缓慢减小,甚至停止的情况,可见非岩溶管道型裂隙的坡面土壤地下漏失现象并不是随着降雨时间的推移稳定存在的。分析其原因,对于土壤地下漏失,降雨需要经过土壤层入渗,形成地下漏失通道,但是在降雨初期,雨滴溅蚀作用不但可使土体颗粒破碎、分散和飞溅,破坏土壤表面结构,而且可击实表层土壤,导致土壤空隙堵塞而形成地表结皮,进而阻碍降雨入渗,影响土壤地下漏失的发展。严友进等^[31]实验也表明,降雨溅蚀产生的土壤

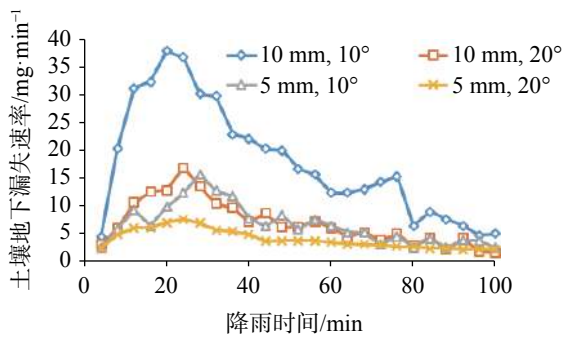


图8 降雨时长与土壤地下漏失速率的关系

Fig. 8 Relationship between the rate of soil underground leakage and rainfall duration

颗粒会进入地下裂(孔)隙后并淤积,堵塞80%的地表土壤大孔隙。所以土壤地下漏失速率也会一并受到影响,直至停止。降雨如何主导这一过程,以及降雨过程中土壤流失、漏失的机理仍需进一步研究。

4 结论与建议

(1)表层岩溶带土壤地表流失主要受降雨强度和坡度的影响。土壤地表流失量随降雨强度的增大而增大。土壤地表流失经历溅蚀、面蚀、片蚀以及沟蚀的变化过程。同一降雨强度下土壤地表流失速率先增大再减小直至稳定;土壤地表流失量随坡度的增大而增大,实验中30°坡面经历侵蚀性降雨后,土壤地表流失量最高。因此应当注重高坡度岩溶坡地的土壤地表流失防治;

(2)表层岩溶带土壤地下漏失主要受裂隙宽度、产状和坡度的影响,对降雨强度的响应不明显。土壤地下漏失量与裂隙宽度大小呈正相关;裂隙走向与坡面走向呈30°时最容易发生土壤地下漏失,土壤地下漏失量最大;坡度与土壤地下漏失的发生呈负相关,坡度越大,土壤地下漏失启动时间越大,土壤地下漏失量越少;随着降雨的进行,土壤地下漏失速率变化幅度较大,漏失速率先增加后减小直至停止。无落水洞、漏斗等岩溶管道的岩溶坡面土壤流失的主要形式是地表流失,土壤地下漏失对土壤流失的总贡献率小于5%。应对降雨过程中的岩溶坡地土壤流失,应当以土壤地表流失为主,针对不同坡度、不同裂隙发育程度的坡地因地制宜做好防护措施。

参考文献

[1] 卢耀如. 地质—生态环境与可持续发展: 中国西南及邻近岩溶

地区发展途径[M]. 南京: 河海大学出版社, 2003.

LU Yaoru. Geology-ecological environment and sustainable development: Approaches to development of southwest China and adjacent karst areas[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2003.

[2] 李箐. 石灰岩地区开发与治理[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1996.

LI Jing. Development and management of limestone area [M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1996.

[3] 蒋忠诚, 李先琨, 胡宝清. 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.

JIANG Zhongcheng, LI Xiankun, HU Baoqing. Study on rocky desertification and its comprehensive control in karst mountainous areas of Guangxi[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd. (CSPM), 2011.

[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.

WANG Shijie. The Most Serious Eco-geologically environmental Problem in Southwestern China—Karst Rocky Desertification[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(2): 120-126.

[5] 曾发明, 吴泽燕, 章程, 杨奇勇. 峰丛洼地区石漠化治理的碳汇研究进展[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 67-73.

ZENG Faming, WU Zeyan, ZHANG Cheng, YANG Qiyong. Carbon sink in rocky desertification restoration, Southwest China: A case of the peak-cluster depression areas[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 67-73.

[6] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

YUAN Daoxian. Chinese karst Science[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.

[7] 张殿发, 王世杰, 周德全, 李瑞玲. 贵州省喀斯特地区土地石漠化的内动力作用机制[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 1-5.

ZHANG Dianfa, WANG Shijie, ZHOU Dequan, LI Ruiling. Intrinsic driving mechanism of land rocky Desertification in karst regions of Guizhou Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(4): 1-5.

[8] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 何永彬. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.

ZHANG Xinbao, WANG Shijie, HE Xiubin, WANG Yangchun, HE Yongbin. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes[J]. Earth and Environment, 2007, 35(3): 202-206.

[9] 曹建华, 袁道先, 章程, 蒋忠诚. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 1-8.

CAO Jianhua, YUAN Daoxian, ZHANG Cheng, JIANG Zhongcheng. Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest China[J]. Earth and Environment, 2004, 32(1): 1-8.

[10] 龙健, 江新荣, 邓启琼, 刘方. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本

- 质特征研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 419-427.
- LONG Jian, JIANG Xinrong, DENG Qiqiong, LIU Fang. Characteristics of soil rocky desertification in the karst region of Guizhou Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 419-427.
- [11] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 101-105.
- WANG Shijie. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 101-105.
- [12] Panos Panagos, Cristiano Ballabio, Pasquale Borrelli, Katrin Meusburger, Andreas Klik, Svetla Rousseva, Melita Perčec Tadić, Silas Michaelides, Michaela Hrabalíková, Preben Olsen, Juha Aalto, Mónica Lakatos, Anna Rymaszewicz, Alexandru Dumitrescu, Santiago Beguería, Christine Alewell. Rainfall erosivity in Europe[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 801-814.
- [13] Jomaa S, Barry D A, Brovelli A, Heng B C P, Sander G C, Parlange J Y, Rose C W. Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments[J]. *Catena*, 2012, 92: 38-48.
- [14] 黄晓亚, 陈喜, 张志才, 张增信, 吴杨青, 黄远洋. 西南喀斯特地区降雨集中度及其变化特征分析: 以乌江流域中上游为例[J]. *地球与环境*, 2013, 41(3): 203-208.
- HUANG Xiaoya, CHEN Xi, ZHANG Zhicai, ZHANG Zengxin, WU Yangqing, HUANG Yuanyang. Analysis of daily rainfall concentration and Its change characteristics in southwestern karst regions: A case study of Wujiang catchment[J]. *Earth and Environment*, 2013, 41(3): 203-208.
- [15] 高阿娟, 刘子琦, 李渊, 李凯萍. 喀斯特峡谷区不同经济林地土壤水分变化特征: 以贵州花江示范区为例[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(6): 863-872.
- GAO Ajuan, LIU Ziqi, LI Yuan, LI Kaiping. Study on soil moisture variation characteristics of different economic forest lands in karst gorge area: A case study of Huajiang demonstration area in Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 863-872.
- [16] 李春茂, 陈洪松, 徐勤学, 吴攀, 付智勇. 典型岩溶峰丛洼地坡面土壤水分空间变异性[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(2): 159-167.
- LI Chunmao, CHEN Hongsong, XU Qinxue, WU Pan, FU Zhiyong. Spatial variability of soil moisture on hillslope in typical karst peak-cluster depression areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(2): 159-167.
- [17] 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.
- XIONG Kangning, LI Jin, LONG Mingzhong. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 878-888.
- [18] Xingping Wei, Yaner Yan, Deti Xie, Jiupai Ni, Hugo A. Loaiciga. The soil leakage ratio in the Mudu watershed, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 721.
- [19] 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.
- BAI Zhanguo, WAN Guojiang. A comparative study on distribution of ⁷Be and ¹³⁷Cs in the surface soils in the Western Yunnan and the central Guizhou Provinces[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(1): 43-48.
- [20] 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.
- ZENG Lingyun, WANG Meihua, LI Chunmei. Study on soil erosion and its spatio-temporal change at Hongfeng lake watershed based on RUSLE model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(2): 113-118.
- [21] FENG Teng, CHEN Hongsong, WANG Kelin, ZHANG Wei, QI Xiangkun. Modeling soil erosion using a spatially distributed model in a karst catchment of northwest Guangxi, China[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 39(15): 2121-2130.
- [22] DAI Quanhou, PENG Xudong, YANG Zhi, ZHAO Longshan. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area[J]. *CATENA*, 2017, 152: 218-226.
- [23] YAN Youjin, DAI Quanhou, YUAN Yingfei, PENG Xudong, ZHAO Longshan, YANG Jing. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J]. *Geoderma*, 2018, 330: 30-40.
- [24] DAI Quanhou, PENG Xudong, ZHAO Longshan, SHAO Hongbao, YANG Zhi. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes: soil erosion and sediment on karst slopes[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7): 1922-1932.
- [25] DAI Quanhou, LIU Zhengtang, SHAO Hongbao, YANG Zhi. Karst bare slope soil erosion and soil quality: a simulation case study[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 985-995.
- [26] 刘琦, 顾展飞, 卢耀如, 刘之葵. 贵州施秉白云岩溶蚀特性及孔隙特征实验研究[J]. *地球学报*, 2015, 36(4): 413-418.
- LIU Qi, GU Zhanfei, LU Yaoru, LIU Zhikui. The experimental study of dolomite dissolution and pore characteristics in Shibing, Guizhou[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(4): 413-418.
- [27] 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]. 中国: CN112611850A, 2021-04-06.
- [28] 王涵, 刘琦, 任标, 姚邦杰, 廖启迪. 典型喀斯特石漠化地区降雨产流产沙特征[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(3): 6-12.
- WANG Han, LIU Qi, REN Biao, YAO Bangjie, LIAO Qidi. Characteristics of rainfall runoff and sediment yield in typical Karst rocky desertification area[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2019, 37(3): 6-12.
- [29] 张信宝, 王世杰. 浅议喀斯特流域土壤地下漏失的界定[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 602-603.
- ZHANG Xinbao, WANG Shijie. A discussion on the definition of soil leaking in a karst catchment[J]. *Carsologica Sinica*, 2016,

- 35(5): 602-603.
- [30] 魏兴萍, 谢德体, 倪九派, 苏程烜. 重庆岩溶槽谷区山坡土壤的漏失研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 462-473.
WEI Xingping, XIE Deti, NI Jiupai, SU Chenxuan. Soil erosion and loss on slope in karst valley area, Chongqing with ^{137}Cs [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(3): 462-473.
- [31] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 彭旭东, 靳丽. 喀斯特裸坡产流产沙过程实验研究[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 2067-2079.
YAN Youjin, DAI Quanhou, FU Wenbing, PENG Xudong, JIN Li. Runoff and sediment production processes on a karst bare slope[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(6): 2067-2079.

Laboratory simulation study on soil surface loss and underground leakage in the epikarst fissure zone

YAN Yiquan^{1,2}, LIU Qi^{1,2}, DENG Dapeng^{1,2}, WANG Han^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, College 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 The study area, Guanling-Zhenfeng Huajiang demonstration area of karst plateau canyon, covers 51.62 km² with the karst area of 45.39 km². It is a typical area of karst plateau canyon on the Guizhou plateau with an elevation difference between 370 and 1,355 meters. In this study, a simulation device was developed by researchers to investigate soil surface loss and underground leakage in the epikarst fissure zone. By simulating indoor rainfall and controlling the rainfall intensity, slope, fracture width and fracture occurrence, a 90-minute experiment was carried out to probe into the influence of soil surface loss and underground leakage. During the experiment, the data such as run-up time of underground leakage, water and soil surface loss and underground leakage was obtained every 4 minutes. EXCEL 2016 was used for statistical analysis of the data, and Origin 2017 for mapping.

Results show that soil surface loss is mainly affected by rainfall intensity and slope. The loss increases with the intensifying of rainfall and the rising of slope, reaching the highest at 30° slope gradient. Besides, soil underground leakage is mainly affected by fissure width, occurrence and slope, but not obviously affected by rainfall intensity. The leakage is positively correlated with the fissure width, and most likely to occur when the fissure direction is 30° to the slope direction. The slope gradient is negatively correlated with the occurrence of soil underground leakage. During the rainfall, the underground leakage rate changes greatly, experiencing a decrease after an increase and finally reducing to 0. Surface loss is the main form of soil loss on the karst slope without sinkholes and funnels, and soil underground loss contributes less than 5% of the soil loss. Large karst pipelines such as sinkholes and funnels are the main channels of soil underground leakage. These experimental results can provide theoretical reference to the control of soil and water loss as well as the ecological restoration of karst sloping land in southwest China.

Key words karst, simulation experiment, soil surface loss, soil underground leakage

(编辑 黄晨晖)