

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.005

李娟, 邵明, 李法虎, 等. 峰丛洼地岩溶裂隙水土漏失过程室内模拟试验[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2).

LI Juan, SHAO Ming, LI Fahu, et al. Laboratory Simulation on Process of Soil and Water Leakage from Fissures in Karst Peak-cluster Depression [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2).

峰丛洼地岩溶裂隙水土漏失过程室内模拟试验

李娟, 邵明, 李法虎, 赵晗

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 水土漏失控制是喀斯特地区石漠化防治的关键, 因此对水土漏失机理及其影响因素进行探究。[方法] 通过室内模拟试验, 研究水压力(0.3, 1.3, 2.3, 5.5 m 水头)、岩溶裂隙宽度(0.25, 0.5, 0.75, 1.0 cm)和土壤团聚体粒径(0~1.0, 1.0~2.0, 2.0~5.0, 0~5.0 mm)对峰丛洼地水土漏失过程的影响。[结果] 水压力和裂隙宽度越大、团聚体粒径越小或粒组缺失的土壤, 上覆土层越易被击穿。土层被击穿时间约需 2~20 min。在土层被击穿后, 水漏失速率迅速增大并逐渐趋于稳定, 土壤漏失速率则急剧增大至峰值后减小并趋于其稳定值, 且水土漏失速率及其累积漏失量显著大于未击穿土层。水土漏失量随着水压力或裂隙宽度的增大而增大。当裂隙宽度为 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 cm 时, 1.3~5.5 m 水压力时的累积水漏失量分别比 0.3 m 水压力时增大 1.2~13.2, 2.4~131.0, 2.1~167.3, 75.8~141.9 倍。累积土壤漏失量随团聚体粒径的增大而显著减小。在大团聚体缺失时土壤漏失量随着裂隙宽度的增大而减小, 而在小团聚体缺失时则随之而增大。当裂隙宽度为 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 cm 时, 1.0~2.0, 2.0~5.0 mm 团聚体粒组的土壤漏失量分别比 0~1.0 mm 粒组减小 98.4% 和 99.1%, 46.3% 和 83.7%, 43.2% 和 74.0% 及 41.1% 和 27.1%。[结论] 上覆土层的稳定状况决定峰丛洼地水土漏失过程, 水力条件、土壤性质以及岩溶裂隙发育程度是影响其稳定的关键因素。研究结果为揭示喀斯特地区水土漏失机理及其控制措施选择提供了一定的理论支撑。

关键词: 裂隙宽度; 水土漏失; 水压力; 土壤团聚体粒径; 岩溶裂隙

中图分类号: S157.1; S152.3 **文献标识码:** A

Laboratory Simulation on Process of Soil and Water Leakage from Fissures in Karst Peak-cluster Depression

LI Juan, SHAO Ming, LI Fahu, ZHAO Han

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Soil and water loss control is the key to the prevention and control of rocky desertification in karst areas, so the mechanism of soil and water loss and its influencing factors are explored. [Methods] The effects of water pressure (0.3, 1.3, 2.3, and 5.5 m water head height), karst fissure width (0.25, 0.5, 0.75, and 1.0 cm), and soil aggregate size (0~1.0, 1.0~2.0, 2.0~5.0, and 0~5.0 mm) on the process of soil and water leakage in the karst peak-cluster depression were studied through laboratory simulation experiment. [Results] The greater the water pressure and the fissure width were, the smaller the soil aggregate size was, or the absence of certain soil particle groups, the more easily the overlying soil layer was broken down taking approximately 2 to 20 minutes. After the soil layer was broken down, the water leakage rate surged rapidly before stabilizing, while the soil leakage rate peaked and then settled. The rates and cumulative amounts of soil and water leakage from the disrupted soil layer were significantly greater than that of the unbroken one. The cumulative amounts of water and soil leakage increased with the increased water pressure or fissure width. When fissure width was 0.25, 0.5, 0.75, and 1.0 cm, the cumulative amount of water leakage at 1.3 to 5.5 m water pressures was 1.2 to 13.2, 2.4 to 131.0, 2.1 to 167.3, and 75.8 to 141.9

收稿日期: 2023-06-09

修回日期: 2023-07-30

录用日期: 2023-08-10

网络首发日期: 2023-00-00

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502403)

第一作者: 李娟(1995—), 女, 硕士, 主要从事水土保持工作。E-mail: 1285281302@qq.com

通信作者: 李法虎(1963—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: lifahu@cau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

times greater than that at 0.3 m one, respectively. The cumulative soil leakage diminished notably with larger soil aggregate sizes. The absence of larger aggregates led to the decrease of soil leakage with the increase of fissure width but the opposite was true for soils lacking smaller aggregates. When fissure width was 0.25, 0.5, 0.75, and 1.0 cm, the cumulative amounts of soil leakage from 1.0 to 2.0 and 2.0 to 5.0 mm aggregate particle groups were decreased by 98.4% and 99.1%, 46.3% and 83.7%, 43.2% and 74.0% as well as 41.1% and 27.1%, respectively, compared with that of 0 to 1.0 mm one. [Conclusion] The stability of the overlying soil layer plays a pivotal role on the process of soil and water loss in peak-cluster depression, and hydraulic conditions, soil properties, and the degree of karst fissure development critically influence this stability. The research results provide a theoretical support for revealing the mechanism of soil and water leakage and its control measure choice in karst regions.

Keywords: fissure width; soil and water leakage; water pressure; soil aggregate size; karst fissure

Received: 2023-06-09

Revised: 2023-07-30

Accepted: 2023-08-10

Online: 2023-00-00

喀斯特地区水土流失严重阻碍当地社会经济和生态环境的可持续发展^[1-2]。我国西南喀斯特地区位于亚热带湿润季风气候区,雨热丰沛,年均降水量 1 000~2 000 mm,裸露碳酸盐岩面积约为 51 万 km²,是全球面积最大和岩溶发育最强烈的区域,多呈现典型的峰丛洼地地貌特征^[3-4]。由于特殊的地质背景、气候条件以及不合理的土地利用方式,喀斯特地区极易发生石漠化现象,致使区域社会经济发展与生态环境保护矛盾突出^[1-2]。

亚热带湿润气候区的喀斯特地区岩溶裂隙较为发育,土壤入渗率大,成土速率慢,土层薄,土壤可蚀性强,且土壤剖面组成呈 C 层缺失的特殊土壤—岩石双层空间结构^[1,5-6],从而导致坡面侵蚀与地下漏失 2 种形式共存的水土流失现象^[4-5]。与非喀斯特地区或干旱半干旱气候区的喀斯特地区相比,亚热带湿润气候区的喀斯特地区更易发生水土流失,其过程也更为隐蔽和复杂且具有更大的空间异质性^[7-8]。因其特殊的地质构造和岩溶作用,碳酸盐岩内部发育形成的形态各异的裂隙为水土渗漏提供运移通道^[9-11]。坡面侵蚀—裂隙土壤蠕动或坍塌是喀斯特地区土壤流失的主要机理^[12-15]。降雨是影响喀斯特地区水土流失的主要驱动因子^[11,13,15-16]。在正常降雨情况下,喀斯特地区水土通过地表坡面或岩溶裂隙通道垂向流失^[5,15]。但在极端情况下,覆盖在岩溶裂隙上部的土壤,通过基岩内部互相连通的裂隙进入地下暗河或在洼地形成的落水洞,通常意义上的土壤流失转变为以蠕动或坍塌等形式为主的重力侵蚀^[17],从而导致剧烈的水土漏失^[3,5,12,17-19]。土壤垂向漏失是喀斯特地区土壤流失的重要组成部分^[4,6,17,20-21],是岩溶地区石漠化问题的主要原因^[5,12,16-18]。由于存在地表与地下 2 种类型的土壤流失形式,因此梯田建设、弃耕还林或植树造林等传统水土保持措施在抑制喀斯特

地区水土流失的效果有时并不是特别有效^[10,20,22]。

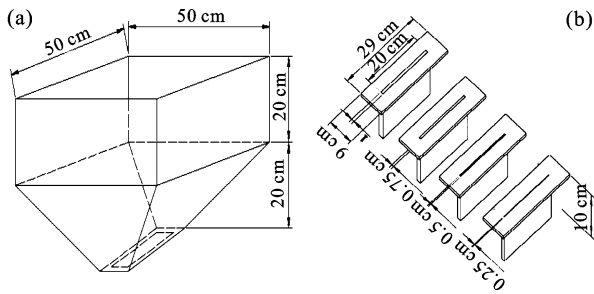
由于传统监测方法如野外径流小区试验或人工降雨等无法直接观测地下径流及其泥沙含量^[3,4,6,17,23],因此对于喀斯特地区水土流失重要组成部分的地下水土漏失过程及其影响机理尚缺乏系统性定量研究。已有的研究^[24-25]结果显示,喀斯特地区的水土漏失速率与岩溶裂隙发育程度及其连通状况密切相关,水土漏失量与裂隙宽度或密度呈正相关关系^[18,26]。此外,土壤团聚体稳定性或其抗剪强度也影响水土漏失量^[6,12,17,27]。CEN 等^[28]的研究结果显示,暴雨或高强度降雨是决定土壤漏失的关键因素,且漏失以土壤蠕动位移为主;YAN 等^[11]研究认为,减小地下裂隙密度是控制土壤漏失的直接方法。峰丛洼地水土漏失是否发生或发生的严重程度与土壤流失的主要驱动力——水力条件或积水深度密切相关^[15,28],同时土壤团聚体粒径与岩溶裂隙直径及其相对大小关系等也对其有一定的影响作用^[12,15,18,26],但这些因素如何影响峰丛洼地水土漏失过程尚未见报道。因此,本研究通过室内模拟试验,研究不同水压力、岩溶裂隙大小以及土壤团聚体粒径组成对峰丛洼地水土漏失过程的影响,以期为喀斯特地区水土流失过程的数值模拟以及水土保持措施的选择提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

试验于 2018 年 5—10 月在中国农业大学水利综合试验大厅进行。室内模拟试验装置由可调控水压力的水箱和可调节底部裂隙宽度的漏斗状土槽 2 部分组成。漏斗状土槽由 4 mm 厚钢板焊接而成,其整体高度为 40 cm(图 1a)。试验土槽的上半部分为长×宽×高为 50 cm×50 cm×20 cm 的矩形结构,

下半部分为高 20 cm、底部长和宽分别为 30、10 cm 的楔形结构。在土槽底部平台的中间部分设置长×宽为 22 cm×6 cm 的孔口,用于连接可拆卸的裂隙通道部件。裂隙通道部件的裂隙高度为 10 cm、长度为 20 cm,其裂隙宽度分别设定为 0.25、0.50、0.75、1.00 cm(图 1b)。



注:(a)为漏斗状试验土槽;(b)为模拟裂隙尺寸。

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of test device

试验所用土壤于 2018 年 5 月取自贵州省息烽县永靖镇(106°46′40″E,27°06′26″N),0—20 cm 的耕表层。贵州省位于中国西南喀斯特岩溶区的中部,以峰丛洼地地貌为主,是受石漠化危害最为严重的地区之一,其喀斯特面积为 11.6 万 km²,占全省陆地面积的 61.2%。永靖镇距贵阳市约 68 km,海拔高程 1 495 m,年均气温和降水量分别为 14.7 °C 和 1 200 mm。将采集的土壤自然风干,除去草根、石块等杂物后过 5 mm 筛备用。供试土壤为黄棕壤,其砂粒(>0.05 mm),粉粒(0.005~0.05 mm),黏粒(<0.005 mm)含量分别为 33.2%,48.0%,18.8%,土壤质地为壤土。

1.2 试验设计与过程

试验由 2 部分组成:(1)水压力和裂隙宽度对水土漏失的影响。试验处理包括 4 个水压力(0.3,1.3,2.3,5.5 m 水头高度)和 4 个岩溶裂隙宽度(0.25,0.50,0.75,1.00 cm)。供试土壤团聚体粒径为 0~5.0 mm(全粒组土壤),土槽填土容重为 1.3 g/cm³,填土厚度为 30 cm;(2)裂隙宽度对粒组缺失土壤水土漏失的影响。试验处理包括 3 个土壤团聚体粒组(0~1.0,1.0~2.0,2.0~5.0 mm)和 4 个岩溶裂隙宽度(0.25,0.50,0.75,1.00 cm),压力水头为 2.3 m,填土容重为 1.3 g/cm³,填土厚度 30 cm。土壤团聚体粒径分组采用不同孔径的筛子筛分后获得。根据野外调查结果和室内模拟实验装置的设计要求,本研究主要模拟微小型岩溶裂隙上覆盖常规厚度土层时的水土漏失^[26,29]。水压力大小根据假设的洼地积水深度设定,土壤团聚体粒组分级根据参考文献以及沉积物堆积形成时的水力与环境条件设定^[6,30]。

将土槽底部裂隙用见水即融的纸盖住,以防土槽装土时土壤颗粒漏失。按试验设计的容重将试验土壤分层均匀地装填到土槽内。土壤装填完成后,在其上部覆盖 2 层粗纱布以避免加水时扰动土壤。将带有密封圈的土槽盖板覆盖到土槽上后,通过螺栓固定紧密以避免压力水外泄。调整由马氏瓶控制水位的高位水箱至设计压力后,通过塑料软管连接土槽并对其缓慢注水。当水从土槽下部裂隙通道中流出时开始计时。用塑料小桶连续收集渗漏水样。试验开始后的前 30 min 内,每隔 1~2 min 用塑料桶收集 1 次水样;30 min 后,每隔 2~5 min 收集 1 次水样。每个试验处理持续进行至水土渗漏速率稳定后停止试验(约 60 min)。试验结束后,采用电子天平将塑料桶连同泥沙水样一起称重。将收集的泥沙水样静置 24 h 后,小心移去上层清液,将剩余样品转移至钢杯中,然后在 105 °C 烘箱中烘至恒重后再次称重,计算水漏失量和土壤漏失量。每个试验处理重复 3 次。

1.3 数据处理

试验数据采用 SPSS 20.0 软件(SPSS Inc., Chicago, USA)进行统计分析。采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)进行方差分析,各处理平均值之间的差异显著性采用最小显著差异法(LSD)进行比较,统计显著性水平设定为 0.05。

2 结果与分析

2.1 水压力和裂隙宽度的影响

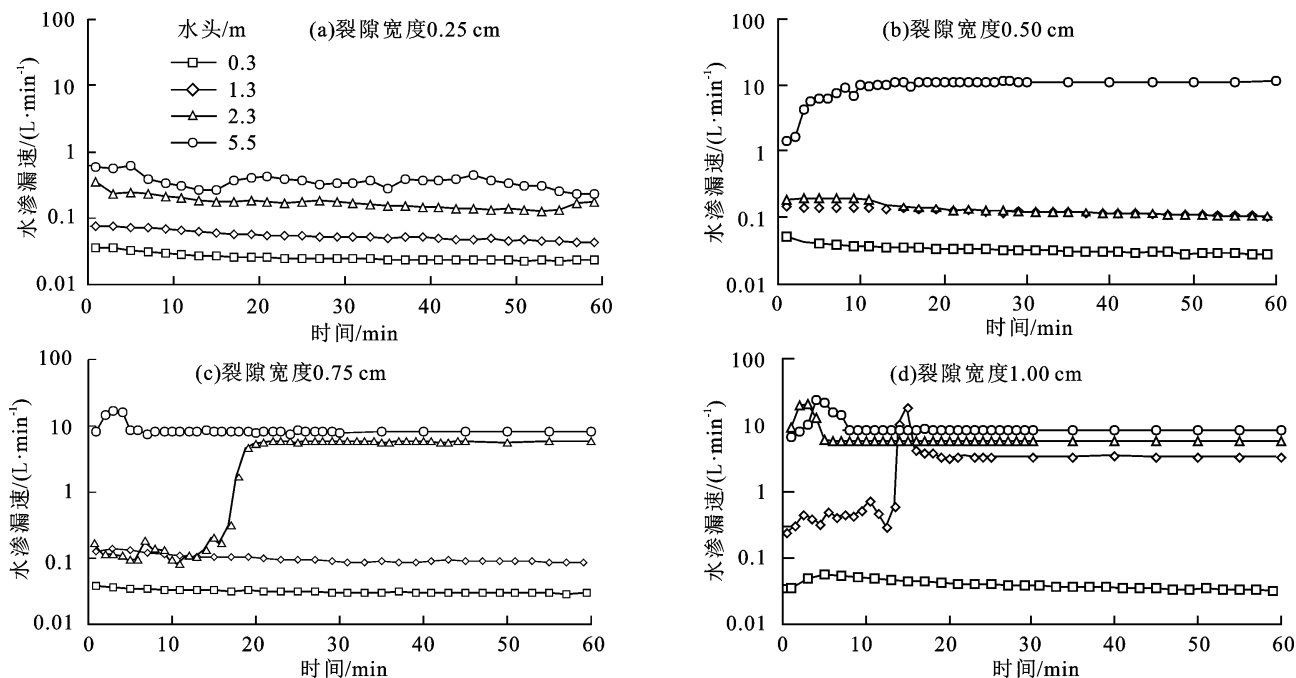
2.1.1 水渗漏速率 不同水压力和裂隙宽度条件下水渗漏速率随试验历时的变化过程见图 2。当上覆土层未被击穿即土层中未形成连通孔洞时,水渗漏速率随着试验历时的增加而减小并逐渐趋于稳定;而在土层被击穿或形成连通通道后,水渗漏速率随着试验历时的增加急剧增大然后逐渐趋于稳定,且击穿后的水渗漏速率显著大于未被击穿时的速率。总体而言,水压力越大,水渗漏速率越大,土层越易被击穿且被击穿所需的时间越短。

在土层未被击穿时,水渗漏速率随着裂隙宽度的增大而稍微增大;而在土层被击穿后,裂隙宽度对水渗漏速率无明显影响(图 2)。裂隙宽度越大,土层被击穿所需要的水压力越小,同时所需要的时间也越短。在试验条件下土层被击穿所需时间一般介于 5~20 min。

2.1.2 土壤漏失速率 在土层未被击穿时,土壤漏失速率随着试验历时的增加而减小并逐渐趋于稳定,且土壤漏失只发生在水压力较大时,而在水压力较小时未探测到土壤流失现象(图 3a)。在土层被击穿

后,土壤漏失速率随着试验历时的增加先急剧增大,达到其最大值后迅速减小并逐渐趋于稳定(图3b~图3d)。被击穿后的土壤漏失速率显著大于未被击穿时

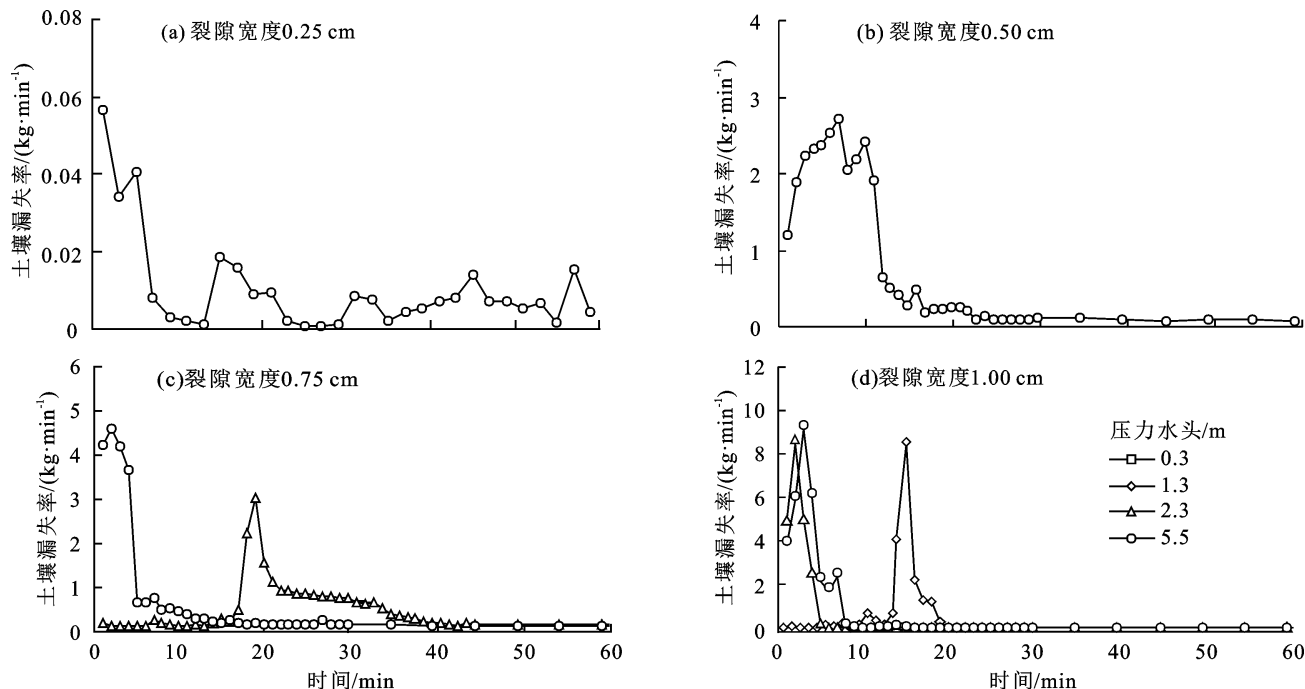
的速率(图3)。土壤漏失速率峰值随着水压力的增加而增大,且其峰值出现的时间也随着水压力的增加而缩短。



注:a、b、c、d的裂隙宽度分别为0.25、0.5、0.75、1.0 cm,土壤团聚体粒径为0~5.0 mm。

图2 不同水压力和裂隙宽度条件下水渗漏速率随试验历时的变化

Fig. 2 Variation of water leaking rate with time under different water pressures and fissure widths



注:a、b、c、d的裂隙宽度分别为0.25、0.5、0.75、1.0 cm,土壤团聚体粒径0~5.0 mm;图中未给出数据的试验处理表示该处理未探测到土壤漏失。

图3 不同水压力和裂隙宽度条件下土壤漏失速率随试验历时的变化

Fig. 3 Variation of soil leaking rate with time under different water pressures and fissure widths

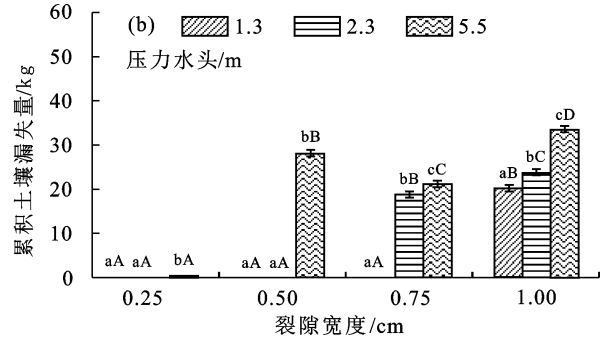
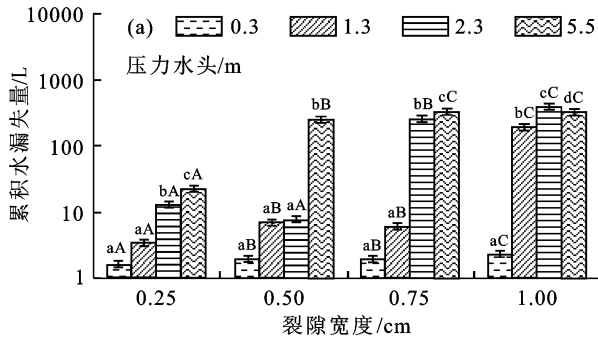
裂隙宽度越大,土壤漏失速率越大,其峰值出现时的水压力越小、发生的时间越早,且土壤漏失速率趋于稳定所需的时间越短(图3)。在试验条件下最

大土壤漏失速率出现在水压力为5.5 m、裂隙宽度为1.0 cm的处理,其峰值为9.4 kg/min。土壤漏失速率峰值的出现时间与土层被击穿的时间基本一致

(图 2、图 3)。

2.1.3 累积水土漏失量 不同水压力和裂隙宽度条件下 60 min 内的累积水土流失量见图 4。总体而言,累积水土漏失量随着水压力或裂隙宽度的增大而增大。当裂隙宽度为 0.25,0.50,0.75,1.00 cm 时,水压力为 1.3,2.3,5.5 m 时的累积水漏失量分别比水压力为 0.3 m 时增大 1.2,7.1,13.2 倍,2.4,2.8,131.0 倍,2.1,129.0,167.3 倍以及 75.8,158.8,141.9 倍。土

层未被击穿时,累积土壤漏失量很小或几乎无漏失;但土层被击穿后,累积水土漏失量均显著大于土层未被击穿时。例如,当水压力为 0.3,1.3 m 时,除裂隙宽度为 1.00 cm 处理的累积土壤漏失量为 20.08 kg 外,其他裂隙宽度条件下土壤均未产生漏失(图 4b);当裂隙宽度为 0.25,0.50,0.75,1.00 cm 时,累积土壤漏失量由 2.3 m 水压力时的 0.002,0.003,18.45,23.65 kg 分别增大到 5.5 m 水压力时的 0.61,27.91,20.93,33.37 kg。



注:土壤团聚体粒径 0~5.0 mm;不同小写字母表示水压力处理之间在 0.05 统计水平差异显著 ($p < 0.05$);不同大写字母表示裂隙宽度处理之间差异显著 ($p < 0.05$);图 b 中未给出压力水头为 0.3 m 处理时的数据,因该处理未探测到土壤漏失。

图 4 累积水漏失量和累积土壤漏失量随水压力和裂隙宽度的变化

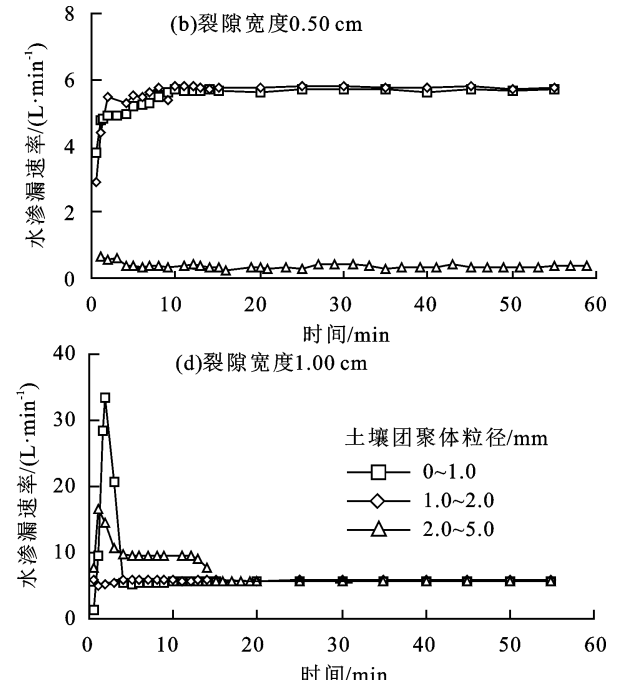
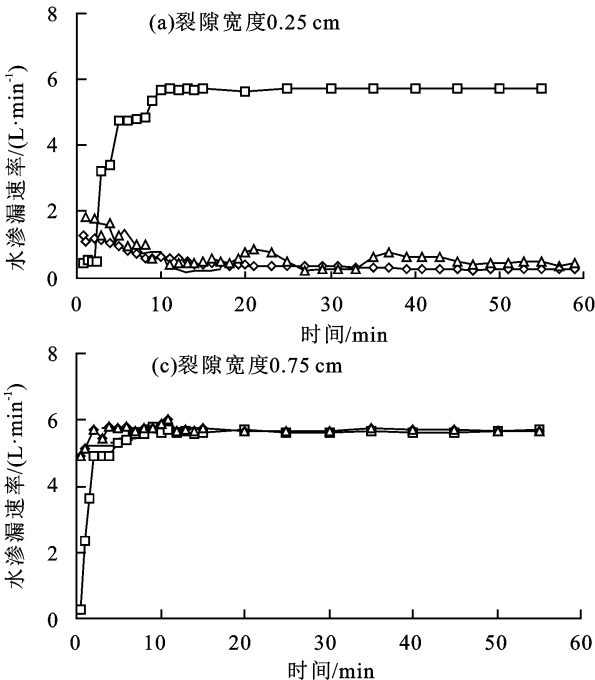
Fig. 4 Variation of cumulative leaked amounts of water and soil with water pressure and fissure width

2.2 团聚体粒径和裂隙宽度的影响

2.2.1 水渗漏速率 粒组缺失土壤的水土漏失过程也与土层击穿与否密切相关。当上覆土层未被击穿时,水渗漏速率随试验历时的增加不断减小直至稳定;而在土层被击穿后,水渗漏速率随试验历时快速

增大然后逐渐趋于稳定。

土壤团聚体粒径对水渗漏速率无明显影响,但土层被击穿后的水渗漏速率远大于土层未被击穿时的速率。团聚体粒径越小,土层越易被击穿(图 5)。



注:压力水头为 2.3 m。下同。

图 5 不同土壤团聚体粒径和裂隙宽度条件下水渗漏速率随试验历时的变化

Fig. 5 Variation of water leaking rate with time under different soil aggregate sizes and fissure widths

裂隙宽度对水渗漏速率无明显影响但裂隙宽度越大,土层越易被击穿。粒组缺失的土壤,其土层被

击穿的所需时间稍微小于全粒组土壤(图 2, 图 5), 大约在 2~10 min 内土层即可被击穿。

2.2.2 土壤漏失速率 当土层未被击穿时, 土壤漏失速率随试验历时逐渐减小直至稳定; 而在土层被击穿后, 土壤漏失速率随试验历时先急剧增大然后减小并逐渐趋于稳定。

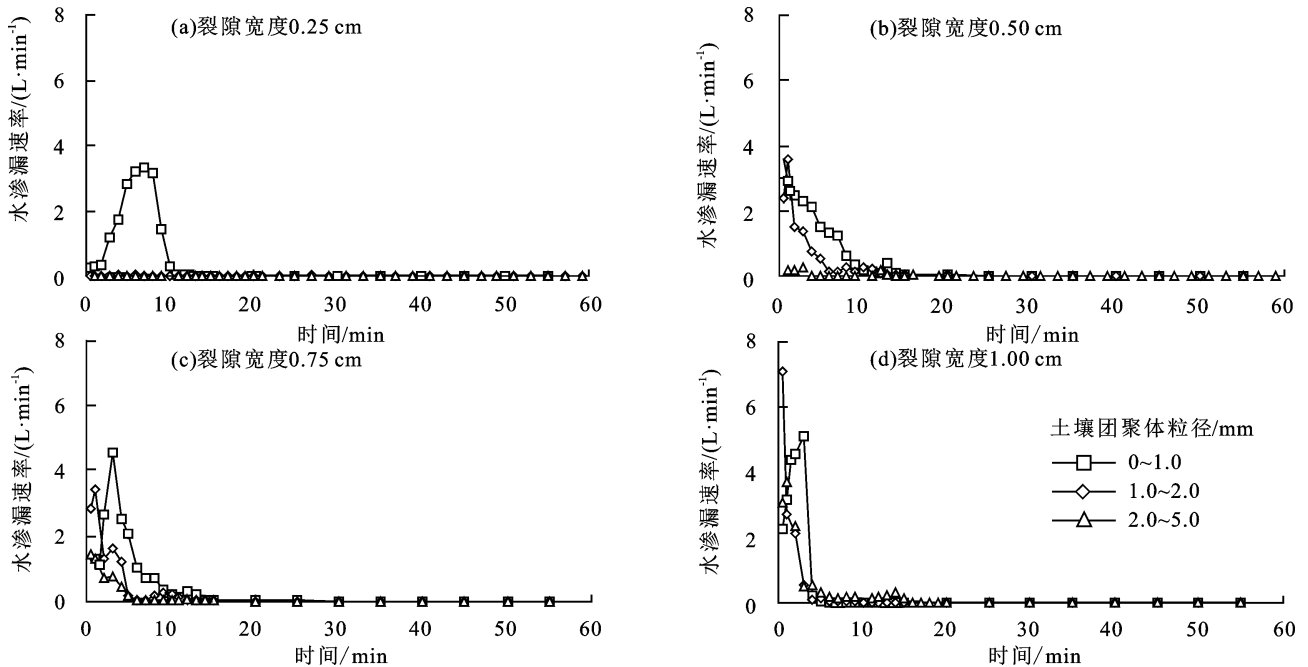
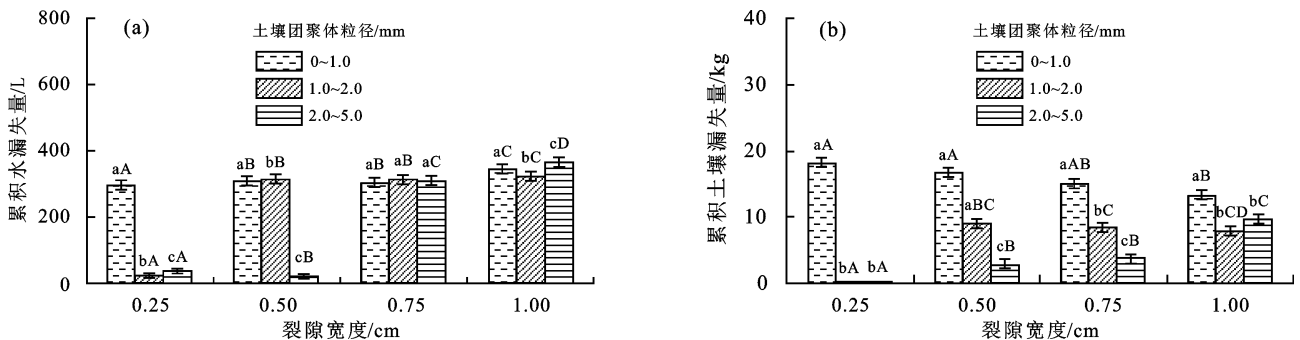


图 6 0~1.0, 1.0~2.0, 2.0~5.0 mm 土壤团聚体粒径以及 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 cm 裂隙宽度条件下土壤漏失速率随试验历时的变化
Fig. 6 Variation of soil leaking rate with time under soil aggregate size of 0 - 1.0, 1.0 - 2.0, and 2.0 - 5.0 mm as well as fissure width of 0.25, 0.5, 0.75, and 1.0 cm

2.2.3 累积水土漏失量 不同团聚体粒径和裂隙宽度处理条件下 60 min 内的累积水土流失量见图 7。总

体而言, 在土层被击穿或未被击穿的相同条件下, 累积水漏失量随土壤团聚体粒径的增大而增大(图 7a)。



注: 压力水头为 2.3 m; 不同小写字母表示土壤团聚体粒径处理之间差异显著 ($p < 0.05$); 不同大写字母表示裂隙宽度处理之间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 7 累积水漏失量和累积土壤漏失量随土壤团聚体粒径的变化

Fig. 7 Variation of Cumulative leaking amounts of water and soil with soil aggregate size

当裂隙宽度为 0.25 cm 时, 累积水漏失量由团聚体粒径为 1.0~2.0 mm 时的 23.1 L 增大到粒径为 2.0~5.0 mm 时的 37.3 L; 而当裂隙宽度为 1.0 cm 时, 其相应值由 31.8 L 增大到 363.5 L。累积土壤漏失量则随着土壤团聚体粒径的增大而显著减小, 且小团聚体粒组的土壤流失量显著大于大团聚体粒组(图

7b)。当裂隙宽度为 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 cm 时, 1.0~2.0, 2.0~5.0 mm 团聚体粒组的累积土壤漏失量分别比 0~1.0 mm 粒组减小 98.4% 和 99.1%, 46.3% 和 83.7%, 43.2% 和 74.0% 以及 41.1% 和 27.1%。累积水漏失量随着裂隙宽度的增大而稍微增大(图 7a)。当裂隙宽度为 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 cm 时, 团聚体粒径

为 1.0~2.0 mm 的累积水漏失量分别为 294.8, 306.8, 302.9, 344.8 L。当土壤团聚体粒径较小(0~1.0 或 1.0~2.0 mm)时,累积土壤漏失量随着裂隙宽度的增大而呈减小之趋势。当裂隙宽度为 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 cm 时,团聚体粒径为 1.0~2.0 mm 的累积土壤漏失量分别为 18.1, 16.7, 15.0, 13.3 kg。而当团聚体粒径较大(2.0~5.0 mm)时,累积土壤漏失量则随着裂隙宽度的增大而增大。土层被击穿后的累积水土漏失量均显著大于未被击穿时的漏失量。

3 讨论

3.1 水压力的影响

在降雨条件下,土壤被浸润饱和,土壤抗剪强度降低且土壤逐渐趋近于流塑状态^[12,17,31-32],从而导致覆盖于岩溶裂隙上方的土壤在重力作用下发生蠕动而进入下部的裂隙内^[12]。当上覆土层未被击穿时,水在土壤中的流动属于正常的土壤渗流^[32],其渗流速率取决于土壤的入渗和水力传导能力,此时无土壤漏失发生或漏失速率极小(图 3)。随着水压力或积水深度的增加,土壤水力传导能力增大,从而导致水渗流速率增大(图 2)。渗流动能越大,随水流移走的土壤越多,土层越易被击穿,土壤漏失速率峰值出现的时间越短(图 3)。在上覆土层被击穿后,土体内形成连通的水流通道^[12],因此水土漏失速率急剧增大,并随着稳定渗漏孔洞的形成而逐渐趋于稳定(图 2 和图 3)。此时,累积水土漏失量随着水压力的增大而显著增大,且土层被击穿后的累积水土漏失量远大于未击穿土层(图 4)。上覆土层在静水压力作用下的土壤漏失影响机理不同于裂隙充填土壤的坡面侵蚀—蠕动—坍塌过程^[12],但其代表降雨积水期间岩溶裂隙土壤漏失的实际情况。

3.2 裂隙宽度的影响

对于全粒组土壤,在上覆土层未被击穿时,虽然较大的裂隙宽度增大渗流通过土体底部的能力,但此时水漏失速率主要取决于土体本身的渗透能力或水力传导能力,因此水漏失速率及其累积漏失量随裂隙宽度增大而增大的程度并不显著(图 2 和图 4a)。在土层被击穿后,土体内连通水流通道和裂隙的过水能力远大于土壤孔隙,因此水渗漏速率由供水速率确定而与裂隙宽度无关(图 2)。裂隙宽度越大,更大的土壤团聚体越易脱落,从而更易形成稳定的连通通道。因此,土层被击穿所需的时间越短,所需的水压力相应也越小,土壤漏失速率也更容易趋于其稳定值(图 3),且土壤漏失速率峰值和累积漏失量越大,其峰值出现的时间也越早(图 3 和图 4b)。

粒组缺失土壤的水土漏失速率随试验历时的变

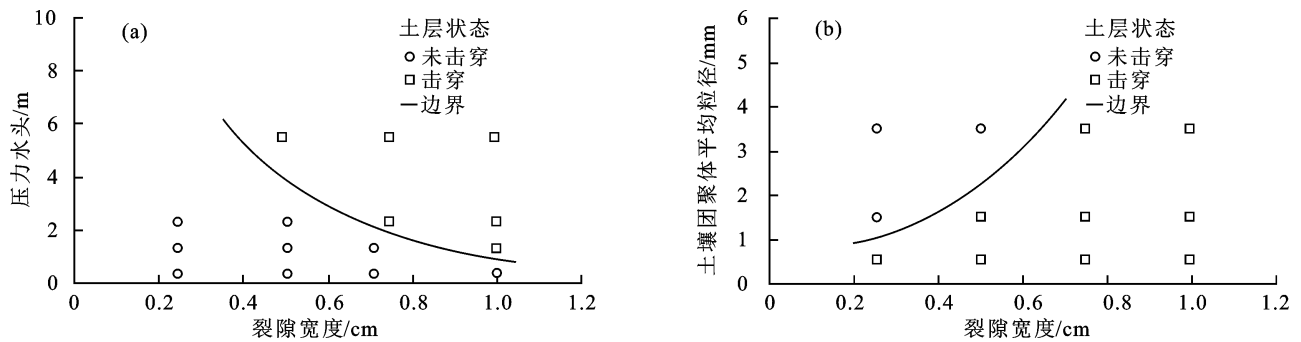
化趋势与全粒组土壤的基本相似(图 2、图 3、图 5 和图 6),但裂隙宽度对其累积土壤漏失量的影响明显不同于全粒组土壤(图 4b 和图 7b),这与土壤漏失的驱动机理有关^[28]。与全粒组土壤相比,大粒组缺失土壤的大孔隙少而小粒组缺失土壤的大孔隙多,因此水漏失速率及其漏失量随着团聚体粒径的增大而增大(图 5 和图 7a)。在试验过程中发现,当土壤团聚体粒径与裂隙宽度相比较小时,土壤主要以整体向下蠕移的方式流失^[17];而当土壤团聚体粒径与裂隙宽度比较大时,土壤主要是在水浸泡作用下崩解破碎,形成较小的土颗粒后随水流一起流失。当土壤由小团聚体(0~1.0 或 1.0~2.0 mm)组成时,相对于裂隙宽度而言,土颗粒较小,易于随水流流失^[33],此时土颗粒的流失能力依赖于土壤的渗流流速。土体底部的裂隙宽度越大,其水流流速或动能越小,土颗粒流失的可能性越低,因此累积土壤漏失量随着裂隙宽度的增加而呈减小之趋势(图 7b)。反之,当土壤由大团聚体(2.0~5.0 mm)组成时,土颗粒相对较大,此时的土壤漏失主要由团聚体崩解分裂后的蠕动和跌落所控制^[12],因此裂隙宽度越大,土壤漏失的可能性及其累积漏失量也相应地越大(图 7b)。因此,通过一定措施如植被恢复或土壤结构改良剂应用等^[6,34],增加大团聚体数量并提高其水稳性对降低土壤漏失风险具有重要意义。

3.3 土壤团聚体粒径的影响

在上覆土层未被击穿时,组成土壤的团聚体粒径越小,其细颗粒越易随水流流失^[6,17,28],因此土壤漏失速率及其累积漏失量越大(图 6 和图 7b)。此外,团聚体粒径越小的土壤,其孔隙直径越小,水流阻力越大,上覆土层在水压力作用下越易于被击穿,土层被击穿时所需的岩溶裂隙宽度也越小(图 5 和图 6)。在小团聚体粒组缺失的土壤中,较多的大孔隙导致其渗流速率主要取决于水压力,而与土壤团聚体粒径无明显关系(图 5a)。在土层被击穿后,由于土体内形成的连通通道,土壤团聚体粒径对水渗漏速率及其累积漏失量无明显影响(图 5 和图 7a)。当裂隙宽度为 1.0 cm 时,土层被击穿初期水渗漏速率急剧增大的原因与土层上部储水的突然下泄有关(图 2d 和图 5d)。然而,土颗粒粒径越小,越易通过连通通道漏失,因此土壤漏失速率及其累积漏失量越大(图 6 和图 7b),且小团聚体粒组土壤的累积流失量大于大团聚体粒组土壤(图 7b)。此外,小颗粒土壤的流失增大通道直径,从而导致更大的土颗粒流失,直至形成相对稳定的连通通道^[12,32]。因此,土壤团聚体粒径越小,土壤漏失速率趋于稳定所需的时间相对越长(图 6)。

3.4 土层被击穿可能性与水土漏失治理暗示

试验结果显示,喀斯特地区的水土漏失现象是一个突发过程,岩溶裂隙上覆土层击穿与否决定水土漏失速率及其累积漏失量。土层是否被击穿与水压力、裂隙宽度以及土壤团聚体粒径组成等因素密切相关。总体而言,水压力或裂隙宽度越大,土层越容易被击穿;而土壤团聚体粒径越小或裂隙宽度越大,土层越容易被击穿。图 8 为试验条件下上覆土层稳定状态



注:图 a 的土壤团聚体粒径为 0~5.0 mm;图 b 的压力水头为 2.3 m。

图 8 水压力与裂隙宽度以及土壤团聚体粒径与裂隙宽度影响下上覆土层被击穿状况分布

Fig. 8 Breakdown status distribution of overlying soil layer affected by water pressure and fissure width as well as soil aggregate size and fissure width

在给定的自然环境(如上覆土层厚度、降雨和岩溶裂隙发育程度等)条件下,通过人工排水减小洼地积水深度、恢复植被覆盖或应用化学改良剂改善土壤团聚体组成及其稳定性等,可在一定程度上降低喀斯特峰丛洼地降雨积水期间土壤漏失的程度或危害。

4 结论

(1)当土层未被击穿时,水漏失速率随着试验历时的增加逐渐趋于其稳定值;一旦土层被击穿后,水渗漏速率则快速增大后逐渐趋于稳定,而土壤漏失速率则急剧增大至峰值后减小并逐渐趋于其稳定值。在试验条件下,全粒组土壤的最大土壤漏失速率峰值为 9.4 kg/min,粒组缺失土壤的最大漏失速率为 3.3~5.1 kg/min。

(2)累积水土漏失量随着水压力或裂隙宽度的增大而增大。当裂隙宽度为 0.25,0.5,0.75,1.0 cm 时,水压力为 1.3,2.3,5.5 m 时的累积水漏失量分别比水压力为 0.3 m 时增大 1.2,7.1,13.2 倍,2.4,2.8,131.0 倍,2.1,129.0,167.3 倍以及 75.8,158.8,141.9 倍。粒组缺失土壤的团聚体粒径和裂隙宽度对水漏失无显著影响,而土壤漏失量则随着土壤团聚体粒径的增大而显著减小。当裂隙宽度为 0.25,0.5,0.75,1.0 cm 时,1.0~2.0,2.0~5.0 mm 团聚体粒组的累积土壤漏失量分别比 0~1.0 mm 粒组减小 98.4% 和 99.1%,46.3% 和 83.7%,43.2% 和 74.0% 以及 41.1% 和 27.1%。当土壤团聚体粒径较小(0~1.0 或 1.0~2.0

与水压力、裂隙宽度以及土壤团聚体粒径之间的基本关系。

在 2.3 m 水压力条件下,全粒组(0~5.0 mm)土壤在较小(0.25,0.5 cm)裂隙宽度时未被击穿(图 2a 和图 2b),而团聚体粒径为 0~1.0,1.0~2.0 mm 的土壤在相同裂隙宽度时则被击穿(图 5a 和图 5b)。这说明与粒组缺失土壤相比,全粒组土壤对控制水土漏失具有积极作用。

mm)时,累积土壤漏失量随着裂隙宽度的增大而呈减小之趋势;而当团聚体粒径较大(2.0~5.0 mm)时,则随着裂隙宽度的增大而显著增大。

(3)水压力或裂隙宽度越大,上覆土层越易被击穿。土壤团聚体粒径越小或裂隙宽度越大,粒组缺失的土层越易被击穿。与全粒组土壤相比,粒组缺失的土层更易于被击穿。全粒组土壤土层被击穿的时间在 5~20 min,而粒组缺失土壤的被击穿时间在 2~10 min。土层被击穿后的水土漏失速率及其累积漏失量显著大于未击穿土层。

喀斯特峰丛洼地水土漏失是一个突发过程,其漏失速率以及累积漏失量与岩溶裂隙上覆土层是否被击穿密切相关。水压力、岩溶裂隙宽度以及土壤团聚体粒径大小决定上覆土层的稳定状况。如何维持上覆土层稳定、防止土层被击穿是决定喀斯特峰丛洼地石漠化治理措施有效性的关键所在。

参考文献:

- [1] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [2] ZHAO L S, HOU R. Human causes of soil loss in rural karst environments: A case study of Guizhou, China [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: e3225.
- [3] CAO Z H, ZHANG Z D, ZHANG K L, et al. Identifying and estimating soil erosion and sedimentation in small Karst watersheds using a composite fingerprint

- technique[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 294: e106881.
- [4] DAI Q H, PENG X D, WANG P J, et al. Surface erosion and underground leakage of yellow soil on slopes in Karst regions of southwest China[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(8): 2438-2448.
- [5] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 1-8.
- PENG X D, DAI Q H, LI C L. Research progress on the process and mechanism of soil water loss or leakage on slope in southwest karst of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 1-8.
- [6] TANG Y Q, SUN K, ZHANG X H, et al. Microstructure changes of red clay during its loss and leakage in the karst rocky desertification area [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): e537.
- [7] YAN Y J, DAI Q H, JIN L, et al. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China[J]. *Catena*, 2019, 174(6): 48-58.
- [8] CALCO-CASES A, BOIX-FAYOS C, IMESON A C. Runoff generation, sediment movement and soil water behaviour on calcareous (limestone) slopes of some Mediterranean environments in southeast Spain[J]. *Geomorphology*, 2003, 50(1/3): 269-291.
- [9] AKDIM B. Karst landscape and hydrology in Morocco: Research trends and perspectives [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 251-265.
- [10] ZHANG X B, BAI X Y, HE X B. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the Karst Mountain areas of southwest China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2011, 26(2): 149-153.
- [11] 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.
- [12] WANG J X, ZOU B P, LIU Y, et al. Erosion-creep-collapse mechanism of underground soil loss for the Karst rocky desertification in Chenqi Village, Puding County, Guizhou, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2751-2764.
- [13] CAO L, WANG S J, PENG T, et al. Monitoring of suspended sediment load and transport in an agroforestry watershed on a karst plateau, Southwest China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 299: e106976.
- [14] WEI X P, YAN Y N, XIE D T, et al. The soil leakage ratio in the Mudu watershed, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 10. 1007/s12665-016-5351-9.
- [15] ZENG F M, JIANG Z C, SHEN L N, et al. Assessment of multiple and interacting modes of soil loss in the Karst critical zone, Southwest China (SWC)[J]. *Geomorphology*, 2018, 322: 97-106.
- [16] 郭红艳, 周金星. 石漠化地区水土地下漏失治理[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(5): 71-76.
- GUO H Y, ZHOU J X. Underground soil and water leakage in Karst rocky desertification areas[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(5): 71-76.
- [17] ZHOU J, TANG Y Q, YANG P, et al. Inference of creep mechanism in underground soil loss of Karst conduits I. Conceptual model [J]. *Natural Hazards*, 2012, 62(3): 1191-1215.
- [18] DAI Q H, PENG X D, YANG Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area[J]. *Catena*, 2017, 152: 218-226.
- [19] 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: 53-62.
- [20] CHENG Q Y, WANG S J, PENG T, et al. Sediment sources, soil loss rates and sediment yields in a Karst plateau catchment in Southwest China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 304: e107114.
- [21] PENG X D, DAI Q H, DING G J, et al. Role of underground leakage in soil, water and nutrient loss from a rock-mantled slope in the karst rocky desertification area[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: e124086.
- [22] PENG J, XU Y Q, ZHANG R, et al. Soil erosion monitoring and its implication in a limestone land suffering from rocky desertification in the Huajiang Canyon, Guizhou, Southwest China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(3): 831-841.
- [23] BAI X Y. Assessment of sediment and erosion rates by using the caesium-137 technique in a Chinese polygonal karst depression [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(8): 2151-2158.
- [24] DAI Q H, PENG X D, ZHAO L S, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(7): 1922-1932.
- [25] PENG X D, DAI Q H, LI C L, et al. Role of underground fissure flow in near-surface rainfall-runoff process on a rock mantled slope in the karst rocky desertification area[J]. *Engineering Geology*, 2018, 243: 10-17.
- [26] 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.
- YAN Y Q, LIU Q, DENG D P, et al. Laboratory sim-

- ulation study on soil surface loss and underground leakage in the epikarst fissure zone[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(2): 240-248.
- [27] 徐燕, 龙健. 贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 157-159, 175.
- XU Y, LONG J. Effect of soil physical properties on soil erosion in Guizhou karst mountainous region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 157-159, 175.
- [28] CEN L P, PENG X D, DAI Q H, et al. Creep leakage process of remaining soils in near-surface fissures in a karst area with bedrock outcrops [J]. *Catena*, 2023, 221: e106802.
- [29] PENG X D, WANG X D, DAI Q H, et al. Soil structure and nutrient contents in underground fissures in a rock-mantled slope in the karst rocky desertification area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(3): 10.1007/s12665-019-8708-z.
- [30] IMESON A C, LAVEE H, CALVO A, et al. The erosional response of calcareous soils along a climatological gradient in Southeast Spain[J]. *Geomorphology*, 1998, 24: 3-16.
- [31] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 21-25.
- CHEN H X, LI F H, HAO S L, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 21-25.
- [32] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 56-64.
- CHEN Z Y, ZHOU J X, WANG H J. *Soil Mechanics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 56-64.
- [33] 雷俐, 魏兴琥, 徐喜珍, 等. 粤北岩溶山地土壤垂直渗漏与粒度变化特征[J]. *地理研究*, 2013, 32(12): 2204-2214.
- LEI L, WEI X H, XU X Z, et al. Vertical distribution of migration channels and grain-size change features of soil in karst mountainous areas of northern Guangdong [J]. *Geographical Research*, 2013, 32(12): 2204-2214.
- [34] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 26-31.
- LI F H. *Soil physicochemistry* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 26-31.