

DOI: 10.11779/CJGE2022S2035

# 基岩裸露率与土壤厚度对土壤流失影响的模拟试验

邓大鹏<sup>1, 2</sup>, 刘 琦<sup>\*1, 2</sup>, 卢耀如<sup>1, 2</sup>, 任 标<sup>1, 2</sup>

(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:** 为了研究岩溶地区基岩裸露率与土壤厚度对土壤流失的影响, 利用自制的试验设备, 开展了浅薄土壤下覆表层岩溶裂隙带水文过程及其驱动的土壤运移过程室内模拟试验研究。综合考虑岩溶二元水文地质结构下存在的土壤地表流失与地下漏失现象, 结果表明地表和地下产沙速率随时间的变化先快速上升到峰值之后逐渐减小, 地下产沙速率与土壤厚度呈显著正相关关系, 地表产沙速率与基岩裸露率呈显著负相关关系, 随着基岩裸露率的增大, 地表产沙速率随时间的波动越来越明显; 地表/地下产沙量与基岩裸露率/土壤厚度的相关性较好, 线性相关性系数  $R^2$  均达到了 0.9 以上。地表产沙量随着基岩裸露率、土壤厚度的增加而减小; 而地下产沙量随着基岩裸露率的增大而减小、随着土壤厚度的增加而增大。

**关键词:** 石漠化; 地表流失; 地下漏失; 基岩裸露率; 土壤厚度

中图分类号: S157.1; TU42 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0160-04

作者简介: 邓大鹏(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事水文地质环境地质方面的研究。E-mail: ddpeng@126.com。

## Simulation experiments on influences of bedrock exposed rate and soil thickness on soil erosion

DENG Da-peng<sup>1, 2</sup>, LIU Qi<sup>1, 2</sup>, LU Yao-ru<sup>1, 2</sup>, REN Biao<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the influences of bedrock exposure rate and soil thickness on water and soil loss in karst areas, the simulation experiments are carried out to study the hydrological process and its driving water and soil movement process by the self-made test equipment. Considering the phenomenon of soil surface loss/underground leakage under karst hydrogeological structure, the results show that the characteristics of surface and underground soil loss rate are that the runoff rate rises rapidly to the peak value and then gradually decreases. There is a significant positive correlation between the soil underground leakage rate and the soil thickness, and a significant negative correlation between the soil surface loss rate and the bedrock exposure rate. With the increase of the bedrock exposure rate, the fluctuation of soil surface loss rate with time is more obvious. The correlations between the sediment yield and the bedrock exposure rate/soil thickness are fine, and the linear correlation coefficients  $R^2$  are all above 0.9. The surface sediment yield decreases with the increase of the bedrock exposure rate and soil thickness, and the underground sediment yield decreases with the increase of the bedrock exposure rate but increases with the increase of the soil thickness.

**Key words:** karst rocky desertification; surface loss; underground leakage; bedrock exposed rate; soil thickness

## 0 引言

由于岩溶地区土壤成土速度慢, 土层浅薄且不连续, 基岩裸露率高, 生态破坏之后难以恢复, 加上人多平地少的矛盾较为突出, 导致土壤流失加剧, 演变成严重的石漠化灾害<sup>[1-2]</sup>。石漠化地区的水土流失严重地制约了农业的发展, 进而严重影响当地人民收入和区域经济社会稳定, 同时也会对岩溶生态环境造成严重破坏<sup>[3]</sup>。

由于野外岩溶坡面和裂隙的复杂性和隐蔽性, 目

前仍缺少可行有效的方法在野外对土壤流失特别是土壤地下漏失情况进行定量监测与研究。室内人工模拟降雨试验是研究岩溶地区降雨土壤流失规律的常用方法<sup>[4-5]</sup>, 模拟降雨试验可以缩短试验周期, 创造各种试验条件, 便于观测研究土壤侵蚀的发生演变过程及其

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3003301); 国家自然科学基金项目(41772292); 同济大学第17期实验教学改革专项基金项目

收稿日期: 2022-12-06

\*通信作者(E-mail: liuqi472@163.com)

各个因素之间的内在机制。高翔<sup>[6]</sup>等通过降雨模型试验研究了坡度对岩溶坡面土壤流失的影响, 结果表明随着坡度的增大, 地表径流占比逐渐增大, 总侵蚀量随着坡度的增大而先增大后减小。Cai 等<sup>[7]</sup>通过降雨模型试验研究发现植被覆盖率对土壤流失有重要影响, 在相同的降雨强度和坡度下, 无植被覆盖下坡面的产沙量明显高于有植被覆盖的情况, Dai 等<sup>[8]</sup>、李玲等<sup>[9]</sup>通过模型试验研究了降雨对岩溶坡面水土流失的影响, 结果表明在降雨强度较小的情况下, 岩溶坡面土壤流失仅为地下漏失。也有一些学者通过数值模拟的手段研究了岩溶坡面土壤侵蚀过程, 通过微观机理分析了水土流失规律<sup>[10]</sup>。以上学者研究了坡度、降雨强度和降雨时长等因素对水土流失的影响。石漠化地区岩溶作用强烈, 部分土壤被严重侵蚀而出现基岩裸露的状况, 降雨条件下基岩裸露率越高, 水土流失越敏感<sup>[11]</sup>。此外, 土壤厚度是影响雨水径流调蓄的重要因素, 石漠化地区土壤厚度分布极为不均, 进而导致土壤流失程度存在空间差异<sup>[12]</sup>。因此, 有必要研究基岩裸露率和土壤厚度对土壤流失的影响。

因此本文利用自制的表层岩溶裂隙带水-土(岩)相互作用室内试验设备, 设计制作了含有裂隙通道的岩溶石漠化地区坡面模型, 从而开展浅薄土壤下覆表层岩溶裂隙带水文过程及其驱动的土壤运移过程室内模拟试验研究。通过控制基岩裸露率、土壤厚度等因素, 从而深入研究不同基岩裸露率与不同土壤厚度下土壤地表流失/地下漏失的规律, 为岩溶石漠化地区的水土流失治理提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

土壤样品采自贵州贞丰-关岭花江中度石漠化示范区区内的石灰土, 区内土壤较为浅薄、质地黏重、透水性差, 易在降雨季节发生水土流失。将采集的土样在室内风干后, 并对较大的土壤团块进行分散处理, 留于试验备用。

表层岩溶裂隙带土壤地表流失和地下漏失模拟装置如图 1 所示<sup>[13]</sup>。其中, 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。试验斜坡倾角为 15°, 为了使得模拟试验更有科学性与合理性, 制作了厚度为 1 cm 厚度的石灰岩石板, 石板铺于斜坡上, 并用石板组合成宽度 2 cm、长度 15 cm 竖直裂隙, 制作成为斜坡土盒。根据野外土壤调查结果以及试验设备条件, 将试验条件设置如表 1 所示, 其中基岩裸露率是指在一定统计范围内基岩出露的面积占总面积的百分比, 计算方法为式(1)。在本实验中坡面的尺寸已固定为 0.25 m×0.5 m, 通过改变坡面上方石块在坡面上的投影面积来控制基岩

裸露率。

$$R = S_r / S_t \quad , \quad (1)$$

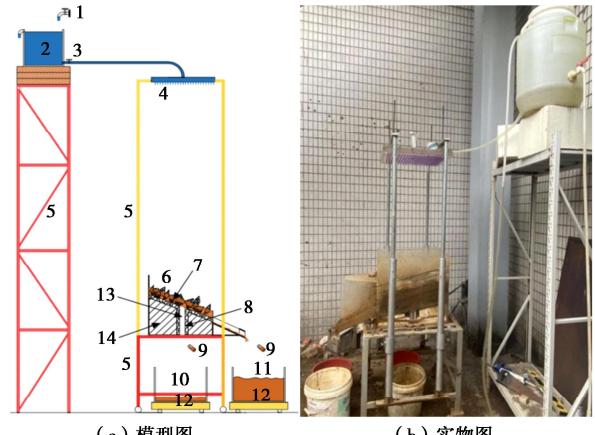
式中,  $R$  表示基岩裸露率,  $S_r$  表示基岩出露面积,  $S_t$  表示统计范围的总面积。

表 1 试验设置条件

Table 1 Test setting conditions

条件	试验设置
降雨强度	20 mm/h
基岩裸露率	60%, 70%, 80%, 90%
土壤厚度	5, 10, 15, 20 cm

本试验采用控制变量的方法进行分组设置, 当研究不同基岩裸露率的影响时, 控制土壤厚度为 10 cm, 当研究土壤厚度的影响时, 控制基岩裸露率为 60%。试验开始前, 将晒干的土壤均匀地铺在模型表面并压实。调整稳压水箱下稳压垫块的高度, 控制供水箱内供水压强, 调整降雨量的大小, 使用小型雨量计进行降雨量测试, 将斜坡土盒模型上面覆盖塑料布。待降雨稳定后, 掀开模型上方的塑料布, 并开始计时。每 5 min 记录一次 4 个电子秤的读数, 并按序号取用采样瓶分别接满地下漏失与地表流失泥水样, 等待后续分析测试。试验持续时间 120 min, 采集 24 组泥水样。试验结束后, 通过烘箱烘干, 得到每组样品中的土壤重量。



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 1 表层岩溶裂隙带水土地表流失和地下漏失模拟装置

Fig. 1 Simulation device for surface loss and underground leakage of soil and water in karst fracture areas

## 2 试验结果与分析

### 2.1 基岩裸露率和土壤厚度对产沙速率的影响

土壤流失是一个动态变化的过程, 地表和地下的产沙速率反映了在降雨不同阶段的土壤流失的变化规律, 是分析土壤流失的一个重要过程指标。相关研究表明土壤密实度和含水率等因素会影响土壤的渗透性

和稳定性,进而影响土壤流失速率<sup>[14]</sup>。本研究主要针对石漠化地区基岩裸露率高、土壤厚度浅薄且空间分布不均的特点,研究基岩裸露率和土壤厚度对产沙速率的影响。

土壤地表产沙速率如图2(a), (b)所示,地表产沙速率与基岩裸露率呈显著负相关关系,基岩裸露率越大,产沙速率相应越小。此外,随着基岩裸露率的增大,地表产沙速率的波动越明显,即地表土壤覆盖率越小,产沙速率越不稳定(图2(a))。地表产沙速率与土壤厚度呈现显著负相关关系,土壤厚度越小,土壤越少,土壤更容易被侵蚀,即地表产流中的土壤含量越大,产沙速率越大(图2(b))。

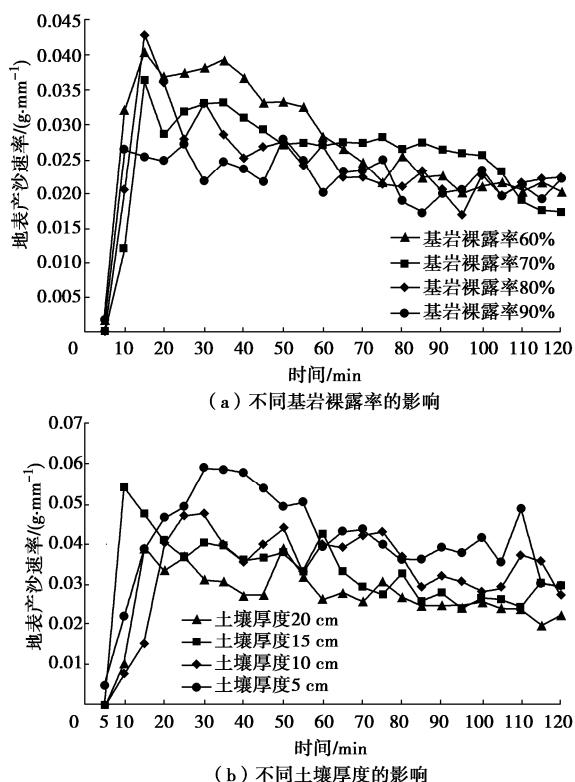


图2 基岩裸露率和土壤厚度对地表产沙速率的影响  
Fig. 2 Effects of exposed rate of bedrock and soil thickness on surface sediment yield rate

地下产沙速率随时间的变化情况如图3(a), (b)所示,可以看出地下产沙速率变化特征都是短时间内增长到一个峰值随后达到一个相对稳定的阶段。不同基岩裸露率的地下产沙速率的峰值大小排序为60%>70%>80%>90%,然后从峰值开始下降,在试验最后阶段地下产沙速率有趋近于稳定的趋势。地下产沙速率与基岩裸露率呈显著负相关关系,基岩裸露率越大,土壤越少,地下产沙速率越小(图3(a))。地下产沙速率与土壤厚度呈显著正相关关系。地下产沙速率变化特征表现为启动后快速达到峰值,然后从峰值开始下降,最后出现相对稳定的趋势(图3(b))。

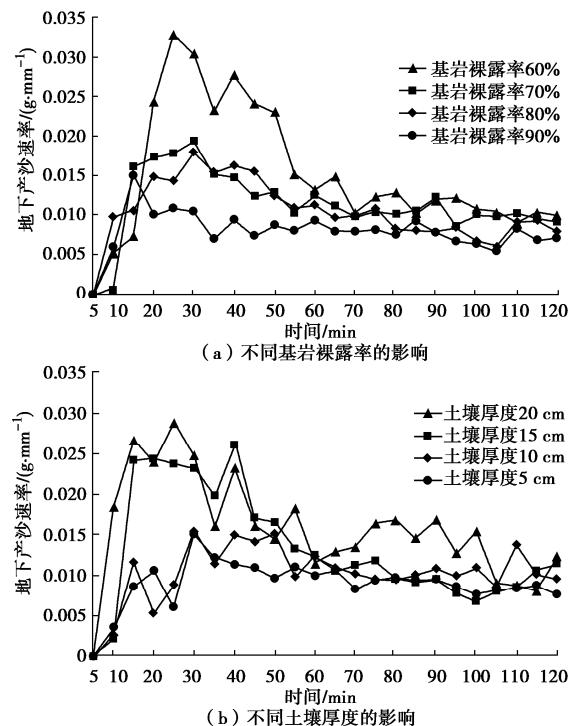
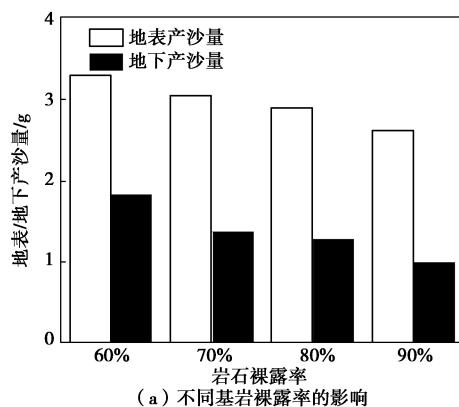


图3 基岩裸露率和土壤厚度对土壤地下产沙速率的影响  
Fig. 3 Effects of exposure rate of bedrock and soil thickness on underground sediment yield rate

## 2.2 基岩裸露率和土壤厚度对产沙量的影响

不同基岩裸露率下地表/地下产沙量如图4(a)所示,地表/地下产沙量与基岩裸露率均呈现显著的负相关性,地表、地下产沙量与基岩裸露率的相关性系数 $R^2$ 分别为0.989, 0.912。随着基岩裸露率的增加,地表和地下产沙量都逐渐减少,即当基岩裸露率变大时,土壤量少,土壤的地表流失量和地下漏失量减少。

不同土壤厚度对地表/地下产沙量的影响如图4(b)所示,地表产沙量与土壤厚度呈现显著的负相关性,相关性系数 $R^2$ 为0.918;地下产沙量与土壤厚度呈现显著的正相关性,相关性系数 $R^2$ 为0.957。随着土壤厚度的增大,地表产沙量减小,而地下漏失产沙量增大,其可能的原因为土壤厚度越大,土体更为稳定,土壤难以通过地表径流而流失,而地下漏失的土壤主要来自于通道上部周围的土体,土壤厚度越大,可漏失的土壤越多,即地下产沙量越大。



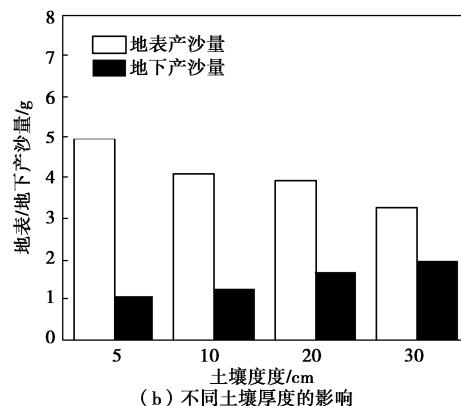


图 4 基岩裸露率和土壤厚度对地表/地下产沙量的影响

Fig. 4 Effects of exposure rate of bedrock and soil thickness on soil loss of surface/underground

### 3 结 论

通过改变不同基岩裸露率与土壤厚度的条件, 开展浅薄土壤下覆表层岩溶裂隙带水土运移过程室内模拟试验研究, 可以得到以下结论:

(1) 地表产沙速率和地下产沙速率变化特征都是随时间的变化先快速上升到峰值随后逐渐变小, 地表产沙速率与土壤厚度呈现显著正相关关系。地表产沙速率与基岩裸露率呈显著负相关关系, 随着基岩裸露率的增大, 地表产沙速率随时间的波动越来越明显。随着基岩裸露率的增加, 地下产沙速率逐渐减小。随着土壤厚度的增加, 地下产沙速率逐渐增大。

(2) 地表/地下产沙量的分析表明地表产沙量、地下产沙量与基岩裸露率/土壤厚度的相关性较好, 线性相关性系数  $R^2$  均达到了 0.9 以上。其中, 地表产沙量随着基岩裸露率、土壤厚度的增加而减小; 而地下产沙量随着基岩裸露率的增大而减小、随着土壤厚度的增加逐渐增大。

### 参考文献:

- [1] LIU Q, DENG D P, YAO B J, et al. Analysis of the Karst springs' supply sources in rocky desertification area of Guanling-Hujiang, Guizhou, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35(3): 1 - 11.
- [2] 卢耀如, 张凤娥, 刘长礼, 等. 中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性[J]. 地球学报, 2006, 27(5): 393 - 402. (LU Yao-ru, ZHANG Feng-e, LIU Chang-li, et al. Karst water resources in typical area of China and their eco-hydrological characteristics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(5): 393 - 402. (in Chinese))
- [3] ZHANG J Y, DAI M H, WANG L C, et al. The challenge and future of rocky desertification control in Karst areas in Southwest China[J]. Solid Earth, 2016, 7(1): 83 - 91.
- [4] 王明刚. 粤北石漠化土地水土流失过程的人工降雨模拟试验研究 [D]. 广州: 华南师范大学, 2007. (WANG Ming-gang. Experimental Study on Artificial Rainfall Simulation of Soil and Water Loss in Rock Desertification Land in Northern Guangdong[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2007. (in Chinese))
- [5] 刘正堂, 戴全厚, 倪九派, 等. 喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 12 - 16. (LIU Zheng-tang, DAI Quan-hou, NI Jiu-pai, et al. Bare slope soil erosion experimental research under the condition of artificial rainfall precipitation in Karst area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 12 - 16. (in Chinese))
- [6] 高翔, 蔡雄飞, 王济, 等. 喀斯特地貌不同坡度下土壤侵蚀经验模型研究[J]. 贵州: 贵州农业科学, 2013(7): 111 - 115. (GAO Xiang, XAI Xiong-fei, WANG Ji, et al. Study on soil erosion model under different slope in Southeast Karst mountain area[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013(7): 111 - 115. (in Chinese))
- [7] CAI X F, JI WAN Y L, et al. Laboratorial simulation on soil erosion under different vegetation coverage in Southwest Karst Area, [C]// 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. May 20-22, 2011, Xi'an. China. IEEE, 2010: 2010 - 2014.
- [8] DAI Q H, PENG X, YANG Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area[J]. CATENA, 2017, 152: 218 - 226.
- [9] 李玲, 周运超, 尹先平. 不同降雨模式下石灰土坡地地表侵蚀特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(6): 1 - 6.
- [10] XIONG X F, LI J H, ZHANG T, et al. Simulation of coupled transport of soil moisture and heat in a typical Karst rocky desertification area, Yunnan Province, Southwest China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 4716 - 4730.
- [11] 李小龙, 王雪冬. 山东废弃石灰岩矿山地质环境特征与治理恢复探索[J]. 地质与资源, 2018, 27(1): 89 - 92.
- [12] MA T S, DENG X, CHEN L, et al. The soil properties and their effects on plant diversity in different degrees of rocky desertification[J]. Science of the Total Environment, 2020, 736: 139667.
- [13] 刘琦, 王涵, 廖启迪, 等. 一种表层岩溶裂隙带土壤地表流失和地下漏失模拟装置: CN112611850A[P]. 2021-04-06.
- [14] 肖军华, 刘建坤, 彭丽云, 等. 黄河冲积粉土的密实度及含水率对力学性质影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 409 - 414.

(编校: 明经平)