

DOI: 10.11779/CJGE2023S10041

# 岩溶坡面土壤地下漏失过程模拟研究

刘 琦<sup>1,2</sup>, 邓大鹏<sup>1</sup>, 鲁克文<sup>3</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;

3. 上海市地矿工程勘察(集团)有限公司, 上海 200436)

**摘 要:** 西南喀斯特地区石漠化现象严重, 其独特的地表地下二元水文地质结构导致了表层岩溶带水土流失不仅表现为坡面水土流失, 同时还存在水土向地下漏失的现象。为揭示岩溶坡面土壤地下漏失过程的规律和机理, 利用物理模拟试验和 CFD-DEM 数值模拟相结合的方法, 分析坡面土壤地下漏失的过程中土壤颗粒运移规律和特征。研究结果表明随着降雨的历程, 坡面不同层位的土壤颗粒运移速度由坡顶到坡底逐渐增大的趋势转变为整个坡面土壤颗粒运移速度趋于一致, 从剖面上看, 土壤颗粒运移速度从降雨初期的表层>中层>底层转变为降雨后期的速度趋于一致; 随着降雨历程, 坡面土壤由地表流失出口和地下漏失口率先侵蚀, 随后坡面形成侵蚀细沟并加剧侵蚀最终发展到坡面整体滑移的过程; 随着降雨的进行, 坡面颗粒与坡面的接触数先显著降低后小幅增大, 裂隙口下缘的颗粒与坡面接触数逐渐增大; 此外, 在降雨过程中, 坡面上的颗粒与坡面在  $Y$  方向的接触力整体上始终较小, 表明降雨过程中颗粒与坡面的相互作用力较弱。

**关键词:** 石漠化; 模拟试验; CFD-DEM 数值模拟; 土壤漏失

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0166-05

**作者简介:** 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研究。E-mail: liuqi472@163.com。

## Simulation of underground leakage process of soil on Karst slopes

LIU Qi<sup>1,2</sup>, DENG Dapeng<sup>1</sup>, LU Kewen<sup>3</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; 3. Shanghai

Geological Engineering Exploration (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The karst rocky desertification is serious in the karst areas of southwest China. Its unique surface and underground dual-hydrogeological structure have led to the water and soil loss in the surface karst zones, which is manifested as slope soil loss and the phenomenon of water and soil leakage to the ground. In order to reveal the law and mechanism of underground leakage of soil on karst slopes, the physical simulation tests and CFD-DEM numerical simulations are used to analyze the law and characteristics of soil particle movement in the process of underground leakage of soil on slopes. The applicability and accuracy of the CFD-DEM numerical model are verified by comparing and analyzing the underground runoff and sediment yield process and the proportional characteristics of the runoff and sediment yield of the physical tests and the numerical model. The results show that the movement speed of soil particles in different layers on the slope surface gradually increases from the top to the bottom of the slope, and it tends to be consistent throughout the slope. From the profile, the movement speed of soil particles changes from the surface layer>the middle layer>the bottom layer at the beginning of rainfall to the same speed at the end of rainfall. With the rainfall process, the soil on the slope is first eroded from the surface runoff outlet and underground leak, and then forms erosion rills on the slope, which further aggravates the process of erosion and finally develops to the overall slope slip. During the rainfall process, the contact number between particles on the slope first significantly decreases and then slightly increases. The contact number between particles on the lower edge of the crack and the slope gradually increases. The contact force between particles and the slope in the  $Y$  direction is small, indicating that the contact force between the particles and the slope is weak during the rainfall process.

**Key words:** karst rocky desertification; simulation test; CFD-DEM numerical simulation; soil leakage

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

收稿日期: 2023-07-05

## 0 引言

中国西南岩溶地区土壤大量流失及其所引发的石漠化问题严重制约着区域经济社会发展<sup>[1-2]</sup>, 岩溶地区特殊的地表-地下二元水文结构导致了该地区不仅有土壤地表流失, 同时存在土壤地下漏失<sup>[3]</sup>。岩溶地区的土壤地下漏失是指土壤以滑动、沉积、伴随水力侵蚀等方式流失<sup>[4]</sup>。目前, 岩溶地区土壤漏失的研究方法主要有野外径流小区监测<sup>[5]</sup>、人工模拟降雨<sup>[6]</sup>、USLE/RUSLE 模型<sup>[7]</sup>、核素示踪<sup>[8]</sup>以及探地雷达技术<sup>[9]</sup>等。这些传统的方法中在各自情况内具有一定优势, 但也有很多的局限性, 比如较难应用于岩溶地区土壤地下漏失过程的观测与分析。岩溶坡面土壤的地下漏失过程是一种典型的非连续介质问题, 离散单元法 (DEM) 可以很好地捕捉细观颗粒的运移特征, 在模拟非连续介质中具有较大的优势。目前离散单元法已广泛应用于边坡失稳、碎屑流运移、土颗粒潜蚀等问题的研究<sup>[10-11]</sup>。其中, CFD-DEM 耦合计算模拟被逐渐应用于涉及水土相互作用的颗粒运移问题的研究。离散单元法作为一种研究非连续介质的方法, 通过研究颗粒的细观力学特性可以较好地揭示土壤地下漏失机理, 但是目前将该方法用于研究岩溶地区流固耦合作用下坡面土壤颗粒地下漏失的成果比较少, 有必要对该问题进行深入研究。

本文通过室内模拟试验与 CFD-DEM 数值模拟相结合的方式, 探究石漠化地区土壤地下漏失过程规律及细观机理。系统揭示岩溶高原峡谷地区二元水文地质结构下土壤的侵蚀特征、驱动及漏失过程机制, 为岩溶石漠化地区水土流失特别是土壤漏失的精准防治提供技术支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 岩溶坡面土壤地下漏失物理模拟试验

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进行室内模拟试验, 试验具体装置、坡面布设与试验方法见已发表成果<sup>[12]</sup>, 试验条件设置如下: 降雨强度为 60 mm/h, 坡面坡度为 20°, 岩溶裂隙管道宽度为 20 mm、裂隙走向为 0°。

### 1.2 基于 CFD-DEM 的土壤地下漏失离散元数值模拟

#### (1) CFD-DEM 流固耦合模型建立

为分析典型岩溶含裂隙坡面土壤地表流失、地下漏失特征, 需要使建立的数值模型中颗粒的细观参数表现的宏观力学特性与实际颗粒的力学特性一致, 以此提高数值模拟的可靠性, 本文选取操作简便的直剪快剪试验获取土的强度指标。固相模型的生成参照室内模型试验实际情况设置, 模型箱设置为 0.5 m×0.25 m×0.5 m (长×宽×高), 固体颗粒及墙体参数的选

择按照 PFC<sup>3D</sup> 直剪试验数值模拟标定的结果选取, 粒径范围为 1~3 mm, 服从随机分布特征。土壤颗粒与墙体间的接触为线性模型, 固相颗粒间接触为线型接触黏结模型。模型采用砂雨法成样, 以更好地模拟边坡的地应力特征。在离散元软件中直接制作含裂隙墙体较为复杂, 本文采用 Rhino 5 软件制作含裂隙坡面模型, 再导入 PFC 软件中模拟墙体。

在 PFC<sup>3D</sup> 中运用 Python 模块实现流固耦合, 渗流条件设置方法为在边界设定压力, 产生压力梯度, 求得流场速度, 最终实现 CFD-DEM 耦合作用, 通过改变入水口和出水口的压力值实现坡面流体流速的变化, 进一步实现降雨强度大小的调节, 本研究主要考虑降雨条件下坡面土壤流失过程, 对不同降雨强度的影响不做具体工况分析。入口压力值恒为 400 Pa, 地下流出面压力值设置为 200 Pa, 地表出水口压力值恒为 0 Pa, 本研究构建的岩溶含裂隙边坡土壤侵蚀流固耦合模型如图 1 所示。

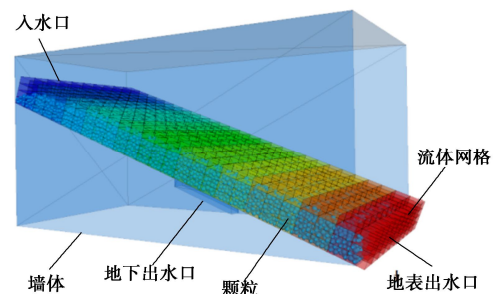


图 1 建立的流固耦合模型

Fig. 1 Established fluid-solid coupling model

#### (2) 模型验证

对不同时刻数值试验和物理试验地下产流量及地下产沙量结果进行对比, 由于本模型是通过设置恒定出口压力的方式所确定的模型边界条件, 受到模型渗透系数、渗透率变化的影响地表出水口流速一直在变化, 故地下产流量的统计方法为: 监测每一时刻地下出水口流速, 将该值乘以模型地表出水口面积得到出水口流量模拟值。将物理和数值模拟试验的地下产流量、地下产沙量及试验时间  $T$  以最大值为基准进行归一化处理, 绘制对比曲线如图 2 (a), (b) 所示。通过综合对比分析物理试验与数值模型的地下产流产沙曲线可以看出, 采用本文所创建的 CFD-DEM 耦合数值模型可以对岩溶坡面水土漏失问题进行有效模拟。

## 2 土壤漏失过程分析

### 2.1 坡面不同层位土壤颗粒运移过程

降雨是土壤漏失的主要诱导因素, 物理试验中难以监测流体和颗粒间的相互作用, 本文所建立的 CFD-DEM 数值模型为分析土壤漏失过程中流体与颗粒的相互作用提供了便利。模型中颗粒的运动特征受流体作用的控制, 因此将不同时刻下流体速度云图与不同

位置颗粒速度进行对比(图3),其中 $T$ 为模拟总时间。由图3(a),(b)可知,在降雨初期( $t < 0.4T$ ),不同层位的颗粒速度均表现出从坡顶到坡底逐渐增大的趋势,其中当 $t$ 由 $0.2T$ 增加到 $0.4T$ ,地下漏失口的颗粒速度明显增大;此外当 $t=0.2T$ 时地表流失出口处不同层位的土壤颗粒速度差异明显(表层>中层>底层),而当 $t=0.4T$ 时,流失口处的颗粒速度趋于一致。由图3(b)~(d)可知,在降雨的中后期( $t > 0.4T$ ),距坡顶不同坡面位置的土壤颗粒速度差异较小。 $t=0.6T \sim T$ 时,坡面颗粒速度不断增大。以上结果表明降雨历程中不同层位不同坡面位置的土壤运动规律为:降雨初期漏失口附近的颗粒运动加快,同时坡脚的土壤也发生流失;降雨的中后期坡面土壤流失速度不断加快且不同层位的土壤流失速度接近。

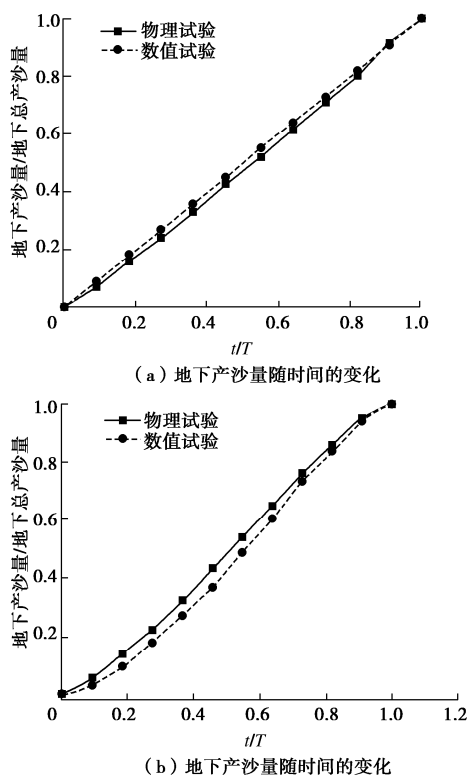


图2 地下产流产沙量物理试验与数值试验的对比

Fig. 2 Comparison between physical and numerical experiments on underground runoff and sediment yield

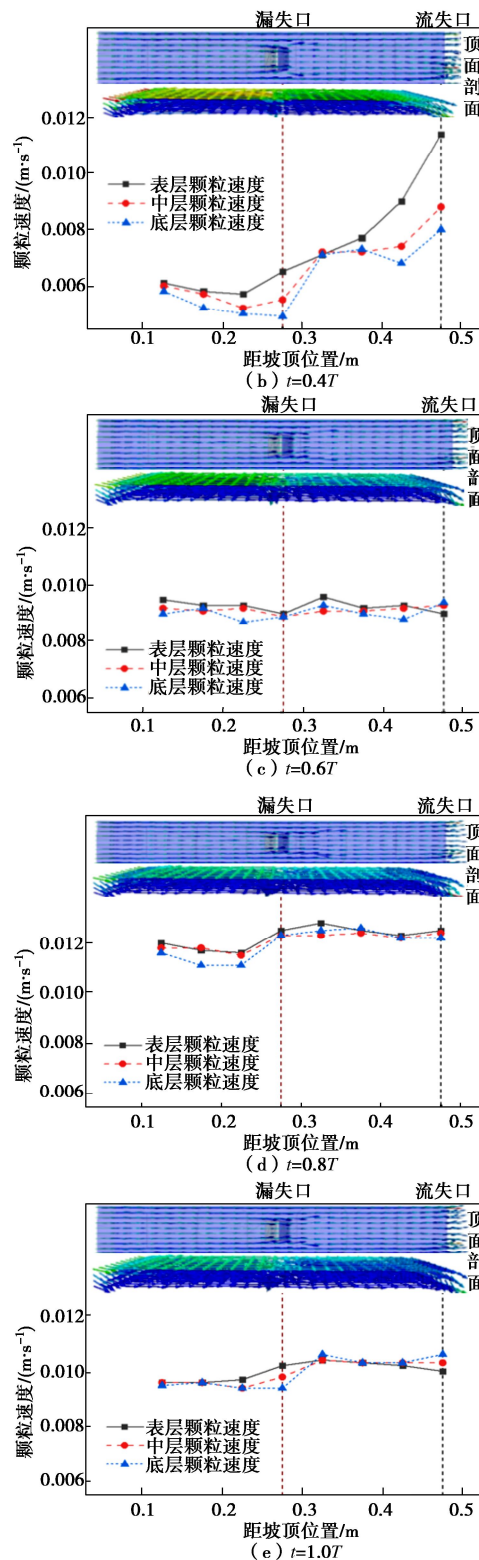
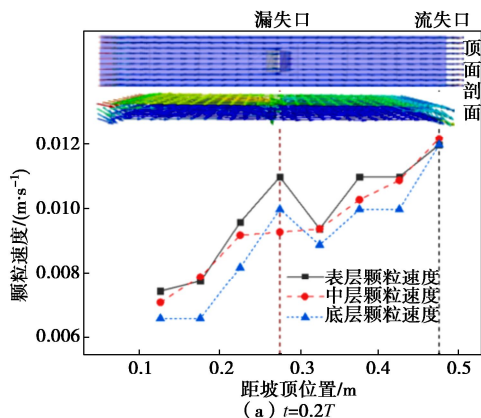


图3 不同坡面位置土壤颗粒速度变化

Fig. 3 Changes in soil particle velocity at different slope positions

## 2.2 坡面侵蚀形态变化过程

将 $t=0.5T$ 时的物理试验结果(坡面土壤侵蚀形态)和CFD-DEM模拟结果(坡面颗粒位移云图)进行对比得到图4的坡面侵蚀形态对比,可见物理试验的坡面侵蚀形态与模拟结果较为吻合,均表现为在降雨中期流失口的土壤由角部先发生侵蚀,此时漏失口



的土壤颗粒也有了较为明显的位移; 在降雨后期, 坡面前端的土壤颗粒发生明显的整体滑移流失, 此时漏失口附近有明显位移的土壤颗粒范围扩大。即岩溶坡面土壤流失规律表现出由流失口和漏失口率先侵蚀发展到整体滑移的过程。

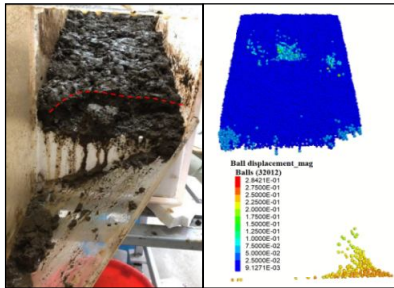


图 4 试验坡面形态与模拟坡面位移云图对比

Fig. 4 Comparison of experimental slope morphology and simulated slope displacement cloud map

2.3 颗粒-坡面相互作用变化过程

颗粒流失过程中颗粒与坡面的相互作用是土壤侵

蚀过程中土壤流失难易程度及是否会发生整体滑移的重要依据。其中, 坡面底层颗粒与坡面接触的摩擦力是主要的影响颗粒滑移进程的重要因素。图 5 为与坡面接触的颗粒在  $Y$  方向 (即顺坡方向) 与坡面间的接触及摩擦力云图, 由图可见, 当降雨开始后, 坡面颗粒在流体力的作用下接触数有明显的降低, 约为初始状态的 37%; 当  $t>0.3T$  之后, 颗粒的接触数小幅增大, 对比图 5 (b), (c), (d) 可以看出, 裂隙口下缘的颗粒与坡面接触数逐渐增多, 主要原因是随着降雨历程, 颗粒逐渐在裂隙口堆积密实, 表现出裂隙口下缘的颗粒与坡面接触数增多的趋势。由  $t=0.9T$  时颗粒与坡面  $Y$  方向接触力分布情况 (图 6) 可以看出来, 在降雨后期大部分颗粒与坡面的接触力依然较小, 超过 70% 颗粒与坡面接触力小于 0.1 N, 并呈现逐级递减的趋势, 表明在降雨后期坡面与颗粒之间的摩擦力较弱, 流体拖曳作用控制着坡面土壤流失的发生和发展。

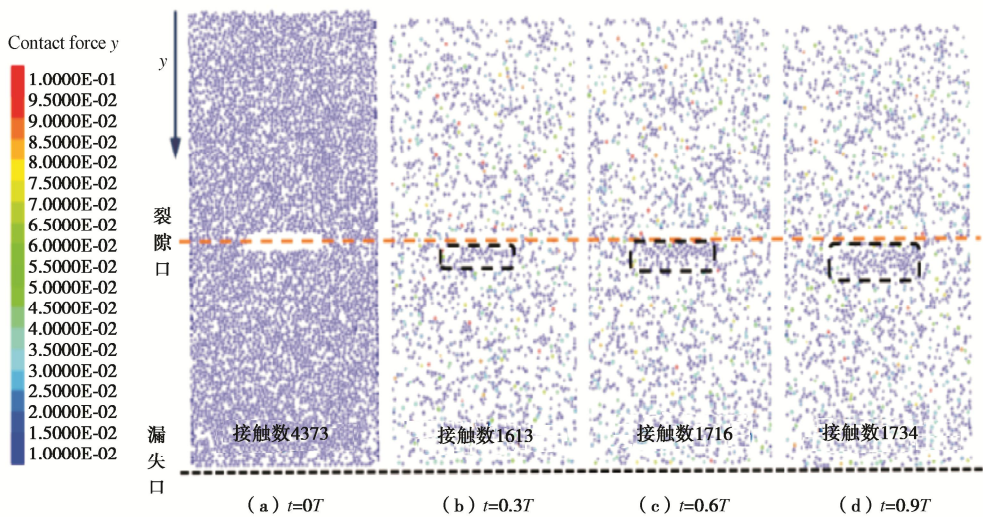


图 5 颗粒与坡面  $Y$  方向接触力云图

Fig. 5 Cloud map of contact force between particles and slope in  $Y$ -direction

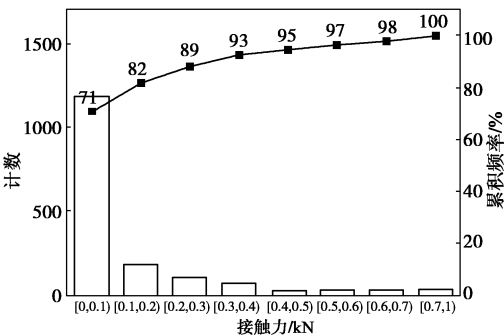


图 6  $t=0.9T$  时颗粒与坡面  $Y$  方向接触力分布

Fig. 6 Distribution of contact force between particles and slope in the  $Y$ -direction at  $t=0.9T$

3 结 论

通过进行降雨驱动下的岩溶坡面土壤地下漏失物理模拟试验和 CFD-DEM 数值模拟, 通过综合对比验证了所构建的 CFD-DEM 流固耦合模型的适用性和准确性, 模拟得到以下结论:

(1) 在降雨初期, 坡面不同层位的土壤颗粒速度均表现出从坡顶到坡底逐渐增大的趋势, 土壤颗粒速度从剖面上表现为表层>中层>底层; 在降雨的中期和后期, 坡面土壤颗粒速度不断加快且不同层位的土壤颗粒速度较为接近。

(2) 坡面侵蚀形态变化过程表现为, 在降雨初期, 地表流失出口和地下漏失口的土壤颗粒先发生侵蚀,

随后坡面部分土壤颗粒开始发生侵蚀并形成细沟, 降雨中期裂隙被土壤颗粒充满并伴随着坡面侵蚀加剧, 降雨后期坡面前端的土壤颗粒发生明显的滑移。

(3) 当降雨启动后, 坡面颗粒在流体力的作用下与坡面的接触数有显著的降低, 随着降雨的继续进行, 颗粒与坡面的接触数小幅增大, 颗粒在裂隙口逐渐堆积, 裂隙口下缘的颗粒与坡面接触数逐渐增大; 此外, 在降雨过程中, 坡面上的颗粒与坡面在  $Y$  方向的接触力整体上始终较小, 表明降雨过程中颗粒与坡面的相互作用力较弱, 流体作用力对土壤流失起主要作用。

### 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-Huajiang, 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 Yaoru, ZHANG Feng'e, LIU Changli, et al. Karst water resources in typical areas of China and their eco-hydrological characteristics[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, **27**(5): 393-402. (in Chinese))
- [3] 魏兴萍, 谢德体, 倪九派, 等. 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 Jiupa, et al. Soil erosion and loss on slope in Karst valley area, Chongqing with  $^{137}\text{Cs}$ [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, **23**(3): 462-473. (in Chinese))
- [4] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2014, **33**(1): 76-84. (YAO Yonghui. Progress and prospect of Karst rocky desertification research in Southwest China[J]. Progress in Geography, 2014, **33**(1): 76-84. (in Chinese))
- [5] WANG L, ZHENG F L, LIU G, et al. Seasonal changes of soil erosion and its spatial distribution on a long gentle hillslope in the Chinese Mollisol region[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, **9**(3): 394-404.
- [6] 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. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 白占国, 万国江. 滇西和黔中表土中 $^{7}\text{Be}$ 与 $^{137}\text{Cs}$ 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  $^{7}\text{Be}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the surface soils in the western Yunnan and the central Guizhou Provinces[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, **22**(1): 43-48. (in Chinese))
- [9] 姚邦杰, 刘琦, 任标, 等. 典型石漠化地区岩溶水系统循环演化分析[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(5): 1179-1187. (YAO Bangjie, LIU Qi, REN Biao, et al. Analysis of cyclic evolution of Karst water system in typical Karst rocky desertification area[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(5): 1179-1187. (in Chinese))
- [10] 周先齐, 徐卫亚, 钮新强, 等. 离散单元法研究进展及应用综述[J]. 岩土力学, 2007, **28**(S1): 408-416. (ZHOU Xianqi, XU Weiya, NIU Xinqiang, et al. A review of distinct element method researching progress and application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 408-416. (in Chinese))
- [11] 李世海, 刘天萃, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊2): 3309-3324. (LI Shihai, LIU Tianping, LIU Xiaoyu. Analysis method for landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3309-3324. (in Chinese))
- [12] 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 Yiquan, LIU Qi, DENG Dapeng, et al. Laboratory simulation study on soil surface loss and underground leakage in the epikarst fissure zone[J]. Carsologica Sinica, 2022, **41**(2): 240-248. (in Chinese))

(编校: 孙振远)