

霍欣康, 刘宏, 向喜琼, 等. 潜蚀作用下覆盖型岩溶塌陷试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 216-229. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.016

HUO Xinkang, LIU Hong, XIANG Xiqiong, et al. Experimental study on overlying karst collapse under the action of underground corrosion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 216-229. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.016

# 潜蚀作用下覆盖型岩溶塌陷试验研究

霍欣康<sup>1</sup>, 刘宏<sup>2</sup>, 向喜琼<sup>2</sup>, 王文俊<sup>2</sup>, 李麟伟<sup>1</sup>

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部实验室, 贵州贵阳 550025)

**摘要:**【目的】明确潜蚀在覆盖型岩溶塌陷中所起的作用对岩溶塌陷机理研究具有重要意义。为确定在潜蚀作用下覆盖型岩溶塌陷的塌陷模式,【方法】设计并搭建了一款物理模型装置,并以徐州废黄河区域新生街与民主北路塌陷为研究对象,在现场勘查基础上,结合研究区的工程地质条件和钻探资料,开展物理模型试验。【结果】结果显示:民主北路塌陷形态为近圆形,平均塌陷范围和塌陷深度分别为35 cm、26 cm;新生街塌陷形态为近圆形,平均塌陷范围和塌陷深度分别为23 cm、17.75 cm。【结论】结果表明:民主北路土层是由最开始的“土洞型”塌陷演化为“沙漏型”塌陷,新生街土层从始至终为“沙漏型”塌陷,“沙漏型”塌陷的塌陷坑范围大小与土层厚度有关,土层越厚,塌陷范围越大;民主北路土层表层位移曲线呈波动向上型,新生街土层表层位移曲线呈阶梯向上型;潜蚀速率越快,土颗粒流失速率变快,土体沉降量越大,越容易发生地面塌陷;原土层颗粒级配越大,潜蚀后通过管道流出土颗粒级配越大。通过试验研究潜蚀作用下岩溶塌陷的演化过程与特征,对岩溶塌陷的防治具有实际意义和参考价值。

**关键词:** 潜蚀作用; 覆盖型岩溶; 塌陷特征; 物理试验; 影响因素; 变形; 地下水

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.016

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)08-0216-14



## Experimental study on overlying karst collapse under the action of underground corrosion

HUO Xinkang<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>2</sup>, XIANG Xiqiong<sup>2</sup>, WANG Wenjun<sup>2</sup>, LI Linwei<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** [Objective] It is of great significance for the study of karst collapse mechanism to clarify the role of water creep in overlying karst collapse. In order to determine the collapse mode of covered karst collapse under the action of underground corrosion, [Methods] A physical model device was designed and built, and the physical model test was carried out on the basis of field investigation, combined with the engineering geological conditions and drilling data in the study area, taking the collapse of Xinsheng Street and Minzhu North Road in the abandoned Yellow River area of Xuzhou as the research object. [Results] The

收稿日期: 2024-10-17; 修回日期: 2025-02-27; 录用日期: 2025-03-24; 网络出版日期: 2025-06-16

基金项目: 国家重点研发计划“深部岩溶塌陷风险精准防控技术装备研发”(2022YFC3003301)

作者简介: 霍欣康(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶塌陷研究。E-mail: 296931264@qq.com

通信作者: 刘宏(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土体稳定研究。E-mail: 43573194@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

result show that the collapse shape of Minzhu North Road is nearly circular, with an average collapse range of 35 cm and an average collapse depth of 26 cm. The collapse shape of Xinsheng Street is nearly circular, with an average collapse range of 23 cm and an average collapse depth of 17.75 cm. [Conclusion]The results show that the soil layer of Minzhu North Road has evolved from the initial “cave-type” collapse to the “hourglass-type” collapse, while the soil layer of Xinsheng Street has been an “hourglass” collapse from beginning to end. The size of the collapse pit of the “hourglass” collapse is related to the thickness of the soil layer; the thicker the soil layer, the larger the collapse range. The displacement curve of the surface layer of the soil at Minzhu North Road showed a fluctuating upward trend, while the displacement curve of the surface layer of the soil at Xinsheng Street showed a stepped upward trend. The faster the latent erosion rate, the faster the soil particle loss rate, the larger the soil settlement, and the more likely a ground collapse will occur. The larger the particle gradation of the original soil layer, the larger the particle gradation of the soil that passes through the pipeline after latent erosion, and vice versa. The experimental study of the evolution process and characteristics of karst collapse under latent erosion has practical significance and reference value for the prevention and control of karst collapse.

**Keywords:** underground corrosion; covered karst; collapse characteristics; physical test; influencing factors; deformation; groundwater

## 0 引言

中国岩溶塌陷地质灾害频发, 全国各地都有岩溶塌陷发生<sup>[1-4]</sup>, 徐州市区地面塌陷开始于 20 世纪 80 年代<sup>[5-6]</sup>, 至今仍不间断的发生, 地面塌陷发生在公路、铁路、居民小区等人流量较大区域, 导致交通长时间堵塞、铁路路基变形、房屋开裂、房屋坍塌, 严重影响了徐州市的城市建设进程和人民的生命财产安全。

岩溶塌陷的成因多种多样, 其中主要为 3 类: 潜蚀论<sup>[7]</sup>、真空吸蚀论以及二者同时作用。潜蚀致塌<sup>[8]</sup>是形成岩溶塌陷的主要方式之一。潜蚀是地下水流的渗流压力达到一定时, 土中的某些颗粒就会被渗透水流携带和搬运<sup>[9]</sup>。潜蚀使土石结构变松, 强度降低, 渗透水流通过一系列特有的作用过程使土体中某些颗粒松动、脱离、被水携带和搬运从而导致土中形成孔洞通道并不断延伸和扩大, 有岩溶洞穴(裂隙)的存在时, 被携带搬运的颗粒就会进入岩溶洞穴(裂隙)中, 这样会使靠近岩溶洞穴的土层中形成土洞, 当土洞的发育到一定程度, 上覆土层无法支撑时就会形成塌陷, 潜蚀作用下形成的地面塌陷具有隐蔽性、突发性, 在地下水水位强烈波动时会诱发塌陷的发生<sup>[10]</sup>。

许多国内外学者对岩溶塌陷破坏机制与特征做了大量研究<sup>[11]</sup>, 其中 BENDAHDANE 等<sup>[12]</sup>根据试验得出不同水力梯度下侵蚀破坏方式不同, 侵蚀程度又取决于土样的黏粒含量。张卜平等<sup>[13]</sup>总结了黄土潜蚀的主控因素, 把黄土潜蚀分为 3 个阶段: 化学溶蚀、水力冲刷、重力崩塌, 明确了黄土潜蚀致塌所要演化的阶段。范士凯<sup>[14]</sup>总结了 1931 年以来武汉市及周边

地区的岩溶塌陷, 从“潜蚀机理”和“真空吸蚀机理”两种塌陷机理阐述了塌陷发生的原因以及潜蚀作用与岩溶塌陷的关系。陶小虎等<sup>[15]</sup>提出渗流方向对岩溶地面塌陷前期土洞的形成起着至关重要的作用, 在同等条件下, 含水层开采地下水资源会破坏岩溶地区的稳定, 导致岩溶地面塌陷更容易发生。罗小杰等<sup>[16]</sup>、康彦仁等<sup>[17]</sup>提出了不同的塌陷机制与塌陷形式, 为岩溶塌陷机理研究提供了理论支持。

也有学者通过物理模型试验<sup>[18]</sup>与数值模拟<sup>[19-21]</sup>研究岩溶塌陷的机制, 来揭示岩溶塌陷破坏模式与演化过程。李京天等<sup>[20]</sup>以曲靖市马龙区岩溶塌陷为例进行物理模型试验, 发现地下水位下降引发负压带和压强增长, 导致塌陷过程分为三个阶段, 并确定临界水位降速可触发塌陷, 为该区岩溶塌陷防治提供参考。洪儒宝等<sup>[22]</sup>通过现场取样和物理模型试验, 监测土体应力-应变信息, 发现孔隙水位变化导致土层应变差异显著, 水位反复升降促使土洞顶板变形并最终引发地面塌陷。张晓宸等<sup>[23]</sup>研究强降雨引发的水位波动对岩溶塌陷的影响, 通过现场勘察和试验, 发现孔隙水压力、土压力和洞室气压随水位波动呈现规律性变化, 连续降雨和间歇降雨对土压和塌陷速度影响不同。郭思源等<sup>[24]</sup>通过一种模拟地下水位倾斜致塌的试验装置研究地下水位线倾斜情况下岩溶地面塌陷的演化过程, 发现距离岩溶通道孔口越近, 土中的孔隙水压力降幅及水力梯度越大, 加速了孔口附近土体的变形和破坏。CHEN 等<sup>[25]</sup>采用物理模型试验与 FLAC3D 数值模拟相结合的方法, 得到了洞穴塌陷与水气压力之间的关系。LIU 等<sup>[26]</sup>通过模型试验和数值模拟揭示了岩溶地区因地下水位的下降导致的覆盖层塌陷的形成机制。

因徐州处于岩溶塌陷频发地区,许多学者也对徐州岩溶塌陷的形成机制和影响因素做了大量研究。熊彩霞等<sup>[27]</sup>对徐州地面塌陷与岩溶水开采的关系进行了研究,分析得出地面塌陷的形成机制并提出了防治措施,为徐州岩溶塌陷频发提供了依据。邢雪等<sup>[28]</sup>、黄敬军等<sup>[29]</sup>通过研究徐州已发生的岩溶塌陷,探明了徐州废黄河区域岩溶塌陷的规律。武鑫等<sup>[30]</sup>通过研究把徐州岩溶塌陷分为“单一透水型盖层、“透-阻型盖层”以及“单一阻水型盖层”三种地质模式,致塌模式分别为“潜蚀渗透-超临界水力梯度致塌”、“潜蚀软化-吸蚀-渗透力致塌”以及“直空吸蚀致塌”。现阶段学者对徐州废黄河区域地面塌陷的研究主要集中在覆盖层的工程性质及特点、构造断裂带对地面塌陷的影响、地面塌陷的形成机制与岩溶地下水位的变化等4个方面,针对在潜蚀作用下覆盖型岩溶塌陷的定量研究较少。

本文采用室内物理试验的研究方法,以徐州废黄河区域民主北路与新生街塌陷为研究对象,借助激光位移计、位移计、水表、三维激光扫描仪等仪器,对潜蚀后试验的不同时间段的出水量进行比较,分析潜蚀发生的阶段及强弱程度;通过不同时间段位移计的沉降量分析潜蚀对岩溶塌陷的影响及土洞发育程度;通过三维激光扫描仪对岩溶塌陷的塌陷坑形态进行对

比分析,研究徐州市废黄河区域的土体渗透变形演化过程与地面塌陷机理。

## 1 研究区基本概况

研究区位于江苏省徐州市云龙区、鼓楼区、泉山区交界处废黄河区域(见图1),属于黄河故道冲积层。经查阅资料与实际现场调查,废黄河区域发生地面塌陷多达十余处,包括1986年最早发生的溶剂厂塌陷、1992年新生街塌陷群、民主北路塌陷、1994年朝阳村塌陷以及2023年夹河街塌陷等,这些塌陷主要集中在废黄河区域。

研究区的基岩为可溶性碳酸盐岩,民主北路岩溶塌陷地层为寒武系中统张夏组,岩性为灰色厚层-巨厚层状鲕状灰岩;新生街岩溶塌陷地层为奥陶系下统马家沟组,岩性为灰色厚层灰岩、豹皮状灰岩夹钙质白云岩。

研究区覆盖层为第四系松散沉积物,主要为粉土、粉砂土、粉质黏土,老黏土。其中粉土、粉砂土为 $Q_4$ ,其厚度占松散层厚度70%左右。粉土性质为土黄-灰黄色,含水率较高,无光泽,干强度低,夹黏性土,土质不均匀;粉砂土性质为黄-灰黄色,以石英、长石为主,中密,颗粒级配不良,分布不均,厚度变化大。粉质黏土、老黏土为 $Q_3$ ,其厚度占松

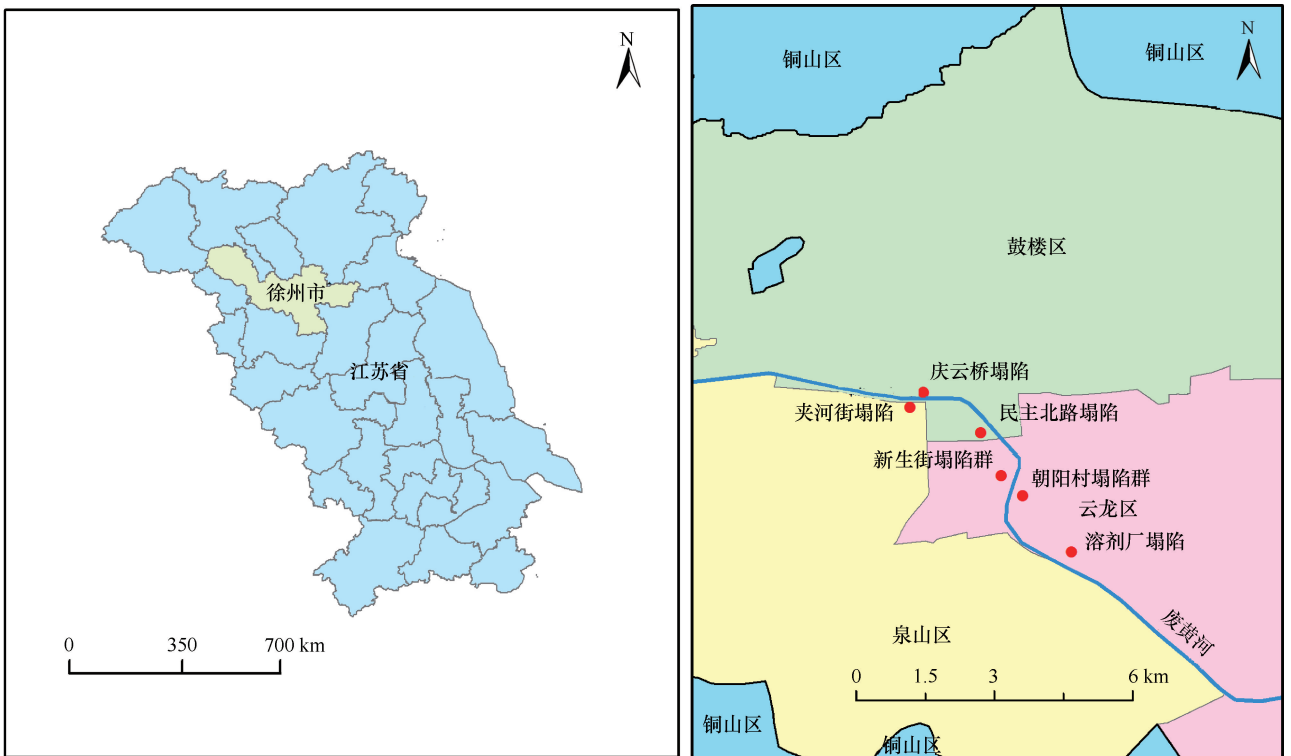


图1 研究区位置

Fig. 1 Traffic map of the study area

散层厚度 30%左右。粉质黏土多呈灰黄色-灰色, 软塑-硬塑, 遇水易崩解; 老黏土呈褐、黄色, 密实, 硬塑状态, 土层裂隙发育, 浸水易崩解。

根据区域水文地质资料, 发现研究区水文地质条件十分复杂, 其塌陷点都在废黄河河道周围(图 2)。其中该地区水文地质条件主要为地表水和地下水。

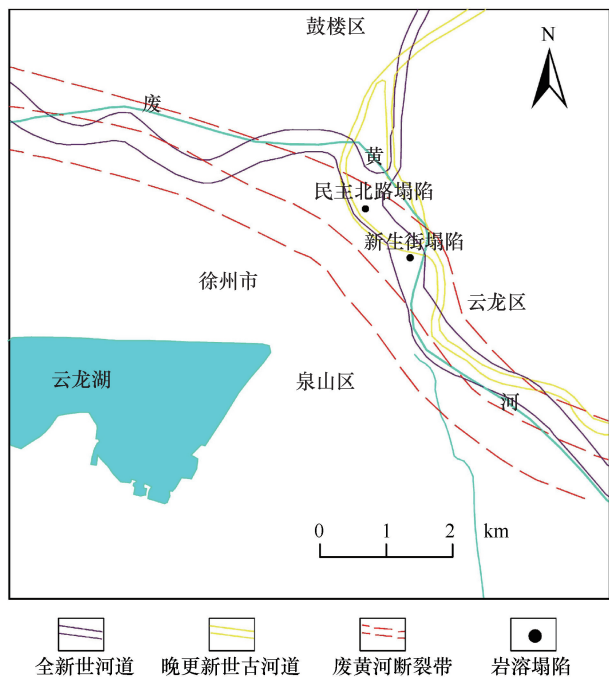


图 2 黄河古河道分布与塌陷关系

Fig. 2 Diagram of the distribution and subsidence of the Yellow River paleochannel

地表水主要为废黄河, 废黄河横贯徐州市区, 历史上是洪灾泛滥较为频繁的一条河道, 市区段自丁楼闸至城头橡胶坝长 41.7 km, 现状建成区段建筑密集, 河底宽 50~100 m, 河底高程 34.0~32.5 m, 水位 37.8~36.8 m。

地下水类型分为潜水(局部为上层滞水)、承压水、基岩裂隙水。潜水主要受大气降水、居民生活用水排放、地表水及河流补给, 水位变化 1~2 m, 水量较小。承压水含水层透水性中等, 富水性中等, 以地下径流的形式补给和排泄, 水位变化幅度 1~3 m。基岩裂隙水主要赋存于寒武系、奥陶系泥灰岩、灰岩溶洞和裂隙中, 受岩体破碎程度、节理裂隙发育程度、溶洞大小、充填物质及充填程度等控制, 水量变化较大。

本区地下水主要受大气降水入渗和周围裂隙侧向补给, 赋存于岩溶裂隙、构造裂隙和溶蚀孔穴中, 沿构造破碎带、节理裂隙密集带或连通较好的

岩溶裂隙等以地下径流的形式排泄, 部分消耗于蒸发。

研究区处于废黄河断裂带北东翼, 废黄河断裂带由 3 条北西向断层组成, 宽达 1.0 km, 倾向南西。断裂带内岩石破碎, 岩溶十分发育, 废黄河断裂带是本区控制岩溶发育的主要构造, 废黄河断裂自西向东穿越徐州市区, 横向切割了不同时代的地层, 次级断层较多, 断裂带内岩石破碎, 裂隙发育、张开性好, 透水性强, 形成了一条大规模的岩溶水强径流带, 为土颗粒流失提供了径流通道, 为岩溶塌陷的发生提供了有利条件。

## 2 模型试验

### 2.1 试验装置

通过野外调查与资料的查询, 对研究区地质条件有了初步的了解, 根据相似比理论, 以及民主北路与新生街塌陷剖面图(见图 3、图 4), 设计潜蚀致岩溶塌陷的物理模型, 该模型试验的设计应当满足相似性原理的要求。

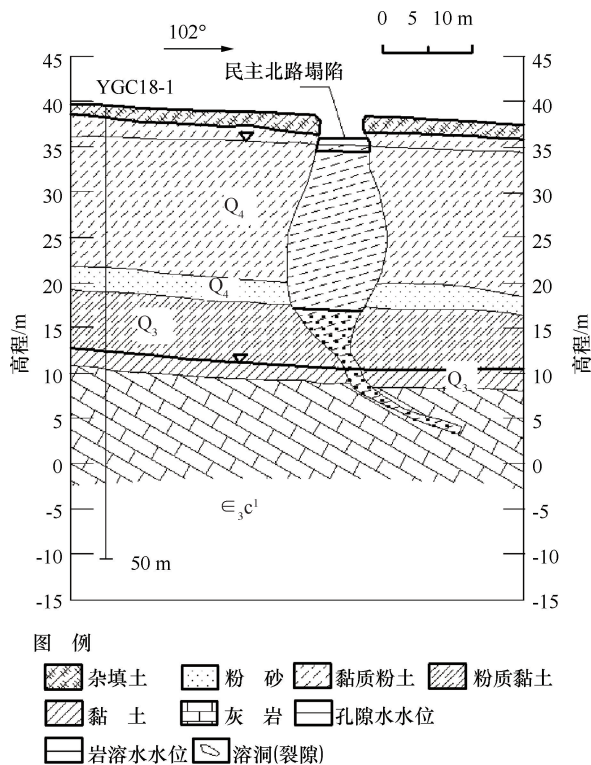


图 3 民主北路塌陷地质剖面

Fig. 3 Geological section of karst collapse area of Minzhu North Road

试验在常规条件下进行, 模型与现场的力学参数相似, 即应力相似比。对于几何相似, 主要考虑模型填土厚度与现场覆盖层厚度相似, 确定几何相似比

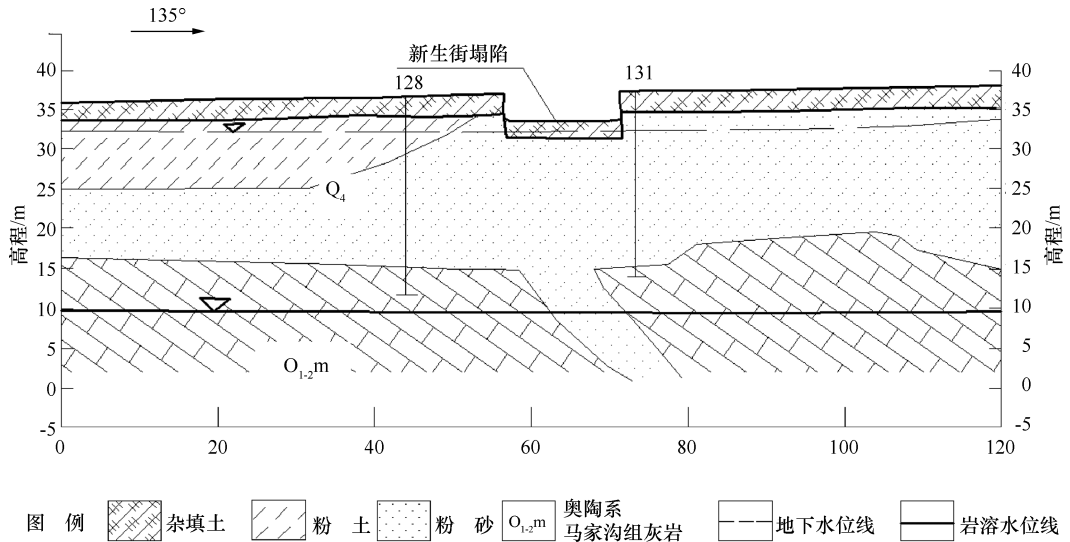


图 4 新升街塌陷地质剖面

Fig. 4 Geological section of karst collapse area of Xinsheng Street

表 1 主要土层物理力学指标参数

Table 1 Main physical and mechanical index parameters of soil layers

土层名称	重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	比重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	天然含水量/%	孔隙比	塑性指数/%	液性指数/%	内摩擦角/ $(^\circ)$
粉砂	19.8	2.66	25.1	0.69	8.1	0.58	34.0
粉土	19.1	2.69	27.7	0.81	7.8	0.82	32.0
粉质黏土	19.3	2.73	27.6	0.80	14.7	0.92	6.6
黏土	19.6	2.76	27.6	0.78	24.2	0.09	13.4

$C_r = 100$ , 依据相似性理论  $C_l C_\gamma = 1$ , 可得材料相似比  $C_\gamma = 0.01$ 。试验用土采用重塑土, 将现场粉砂、粉土、粉质黏土、老黏土烘干、研磨以及过筛后, 按照现场土样基本物理力学性质(见表 1)进行配置, 以保证试验土体状态与现场尽可能一致。

试验模型装置为长方体型垂直渗透模型装置, 如图 5 所示, 左右两侧水箱注水, 下端岩溶裂隙出水, 岩溶裂隙为充填状态模拟现实徐州岩溶裂隙的充填情况, 潜蚀发生以后, 出水口处要注意排水与进水口涌入水量一致。模型装置长 120 cm, 宽 50 cm, 高

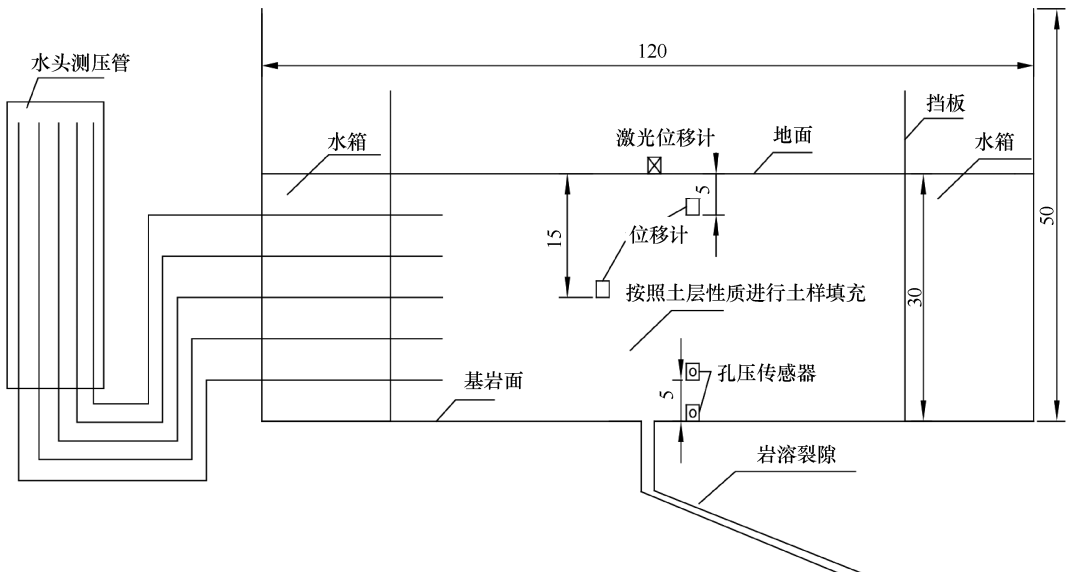


图 5 物理模型与监测仪器布置示意(单位: cm)

Fig. 5 Schematic diagram of the physical model and the layout of the monitoring instruments (Unit: cm)

50 cm, 装土样的高度为 30 cm。为了研究试样内部的水头分布, 在模型装置的左侧均布 5 个水头测压管, 读数时用 50 cm 长钢尺量得水头, 该测压管测数精度为 1 mm。该模型可以模拟潜水位、岩溶裂隙水位变化与潜蚀的关系, 通过模拟不同土层性质下潜蚀致塌过程, 对徐州废黄河区域由潜蚀引起的岩溶塌陷有具体清晰的认识。

运用测压管、水压测量仪、位移计以及摄影机监测潜蚀过程及岩溶塌陷过程数据。

位移计: 对潜蚀过程中的土层位移情况进行监测。

激光位移计: 对表层土体位移进行监测。

测压管: 对各个土层的水头进行测量。

孔压传感器: 测量土层不同位置水压。

三维激光扫描仪: 扫描塌陷坑的形态, 得出塌陷坑的形态特征。

## 2.2 试验步骤

### 2.2.1 填筑土体

土体材料来自徐州废黄河区域工地内, 在试验开始前根据不同试验需要的土层性质进行填筑, 对岩溶管道先进行填充, 填充土为粉砂土, 模拟岩溶管道内有粉砂土充填的情况, 之后对所需填充土体进行填筑, 参考其土层实际含水率、重度, 模型箱体积与设计土层覆盖厚度进行分层填筑, 填筑到设计高度时, 按照设计要求安装位移计与孔压传感器后继续填筑土体, 重复该步骤, 填筑土体完成后, 在土体表面安装激光位移计并安装摄像头记录潜蚀致塌过程。

### 2.2.2 监测仪器的布置

共布置 2 个埋入土中的位移计、1 个监测土体表面位移的激光位移计和 2 个孔压传感器。2 个埋入土中的位移计分别布置在岩溶管道右侧 5 cm、土层深

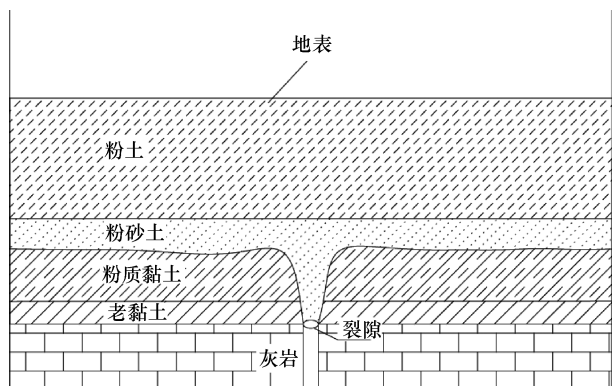
度 15 cm 处以及岩溶管道左侧 5 cm、土层深度 5 cm 处, 激光位移计布置在岩溶管道正上方监测表面土体位移变化, 2 个孔压传感器分别布置在岩溶管道旁 5 cm 处以及岩溶管道前方 5 cm、土层深度 15 cm 处。物理模型与监测仪器布置示意如图 5 所示。

### 2.2.3 试验方案

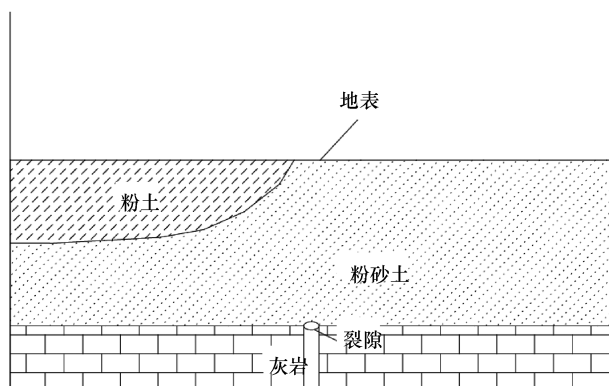
根据民主北路塌陷与新生街塌陷土层性质, 主要将覆盖层分为上透下阻水型盖层与单一透水型盖层, 每种盖层进行 2 组试验, 因民主北路、新生街塌陷潜蚀主要发生在抽水岩溶水位下降后、地下水向岩溶水补给时, 所以模拟地下水位向岩溶水位补给发生潜蚀而引发的地面塌陷。根据相似比理论与民主北路、新生街塌陷剖面图(见图 3、图 4), 几何相似比为 1:0.01, 民主北路覆盖层厚度分别为 30 cm 与 20 cm, 下方溶洞大小分别为 2 cm、10 cm, 考虑到重塑土粒径都小于 2 mm, 且要对比试验, 选择将溶洞大小都设计为 2 cm 更合理, 具体试验设计方案如下。

(1) 覆盖层填充以及岩溶管道数据。图 6(a), 采用民主北路土层以及 2 cm 溶洞通道, 土层用土采用粉土、粉砂土、粉质黏土和老黏土, 粉土和粉砂土的密实度为松散, 粉质黏土状态为软塑, 土层厚度共 30 cm。图 6(b), 采用新生街土层以及 2 cm 溶洞通道, 土层用土采用粉土和粉砂土, 粉土和粉砂土的密实度为松散, 土层厚度共 20 cm。

(2) 将位移计与孔压传感器埋入设计土体且填筑完成后, 进行激光位移计、摄像头的布设, 之后打开摄像头, 自动平衡位移计、孔压传感器、激光位移计的数据并开始采集, 开始向两侧水箱注水, 模拟两侧高水位向中间低水位渗流, 直到两侧水箱低于土层 5 cm 处停止注水, 等待两侧水箱中水向中间土层补给, 并持续向两侧水箱中补水直到既定水位。



(a) 民主北路土层



(b) 新生街土层

图 6 土层结构示意图

Fig. 6 Schematic of soil layer structure

(3) 观测下方岩溶管道是否有水流出, 没有水流出时对两侧水箱注水, 直到下方岩溶管道有水流出时, 说明水流携带出土颗粒流出形成潜蚀, 这时停止注水控制两侧水箱水位, 当潜蚀形成通道时会有较大水流流入岩溶通道, 对两侧水箱水位进行降低, 观察潜蚀作用下塌陷形成过程、塌陷形态的变化、下方岩溶管道水流流速变化。

(4) 当塌陷形成、在潜蚀作用下不断扩大直至极限时, 试验结束, 用三维激光扫描仪对塌陷形态进行扫描, 收集监测数据, 收集模型箱下方流出土体后烘干, 进行颗粒级配试验, 将模型箱土体取出晒干后循环利用。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 塌陷形态与塌陷范围分析

当覆盖层类型为民主北路土层时, 下方的岩溶裂隙为粉砂土颗粒的流失提供空间与通道; 随着两侧与洞口的给水, 土层发生不均匀沉降以及裂缝, 不均匀沉降与

裂缝为粉砂土颗粒提供了渗流通道; 当两侧水箱的高度达到一定高度, 孔隙水压力达到一定程度, 潜蚀开始发生, 水流产生的渗透压携带着粉砂土颗粒向岩溶裂隙方向流失; 因下方土层为黏性土, 渗流通道会出现黏性土层上方, 砂性土层当中, 随着渗流通道的产生、土颗粒的流失, 岩溶裂隙上方的土洞也开始发育, 当土洞发育到一定规模, 长时间的潜蚀会使土洞上方的土体增重、且发生软化, 最终因重力效应而发生塌陷。

第一组试验, 15 min 时塌陷开始, 塌陷为近圆形, 直径为 6 cm, 下方有较大空洞, 塌陷形态为“土洞型”塌陷, 随着试验的进行, 塌陷不断扩大, 30 min 时试验结束, 塌陷为近圆形塌陷, 塌陷直径为 40 cm、深 27 cm, 最终塌陷形态为“沙漏型”塌陷 [见如图 7(a)(b)]。第二组试验, 18 min 时塌陷开始, 塌陷为近圆形, 直径为 8~10 cm, 下方有较大空洞, 塌陷形态为“土洞型”塌陷, 随着试验的进行, 塌陷不断扩大, 50 min 时试验结束, 塌陷为近圆形塌陷, 塌陷直径为 30~36 cm、深 25 cm, 最终塌陷形态



(a) 第一次试验初步塌陷



(b) 第一次试验最终塌陷



(c) 第二次试验初步塌陷



(d) 第二次试验最终塌陷

图 7 民主北路土层塌陷示意

Fig. 7 Diagram of Soil Collapse on Minzhu North Road

为“沙漏型”塌陷[图 7(c)、(d)]。

当覆盖层类型为新生街土层时, 随着两侧与洞口的给水, 土层发生不均匀沉降以及裂缝, 不均匀沉降与裂缝为粉砂土颗粒提供了渗流通道; 当两侧水箱的高度达到一定高度, 孔隙水压力达到一定程度, 潜蚀开始发生, 水流产生的渗透压携带着粉砂土颗粒向岩溶裂隙方向流失; 因下方土层为砂性土, 黏聚力较低, 渗流通道形成后, 随着土颗粒的流失, 土体也向土颗粒流失方向发生位移, 下方土体的流失, 导致上方土体向下方补给, 塌陷也开始形成。

第一组试验, 20 min 时塌陷开始, 塌陷为近椭圆形, 长 15 cm、宽 7 cm, 下方没有空洞, 塌陷形态为“沙漏型”塌陷, 随着试验的进行, 塌陷不断扩大, 50 min 时试验结束, 塌陷为近方形塌陷, 塌陷长 30 cm、宽 20 cm、深 18 cm, 最终塌陷形态为“沙漏型”塌陷[图 8(a)(b)]。第二组试验, 23 min 时塌陷开始, 塌陷为近圆形, 直径为 8 cm, 塌陷形态为“沙漏型”塌陷, 随着试验的进行, 塌陷不断扩大,

55 min 时试验结束, 塌陷为近圆形塌陷, 塌陷直径为 20 cm、深 17.5 cm, 最终塌陷形态为“沙漏型”塌陷[图 8(c)(d)]。

如图 9 所示, 民主北路土层与新生街土层完全塌陷后塌陷形态基本一致, 为近圆形, 且都为漏斗形塌陷, 但在塌陷范围上有所差别。刚开始塌陷时, 民主北路土层塌陷为“土洞型”塌陷, 与其下方黏性土土层性质有关。随着潜蚀不断进行, 土颗粒的不断流失, 上方土体没有支撑, 又因土体吸水后产生的增重效应, 致塌力大于抗塌力, 上方的土体开始不断塌陷, 形成“沙漏型”塌陷后, 与新生街土层的塌陷形态开始一致。两者都为“沙漏型”塌陷, 但其形成的过程是不一样的, 一个为形成“土洞型”塌陷后, 不断扩大形成“沙漏型”塌陷, 一个为塌陷一发生就形成“沙漏型”塌陷。民主北路土层塌陷的范围分别为 40 cm 和 30~36 cm, 深度为 28 cm 和 26 cm。而新生街土层的塌陷范围分别为 30 cm 和 20 cm, 深度为 18 cm 和 17.5 cm。民主北路土层塌陷

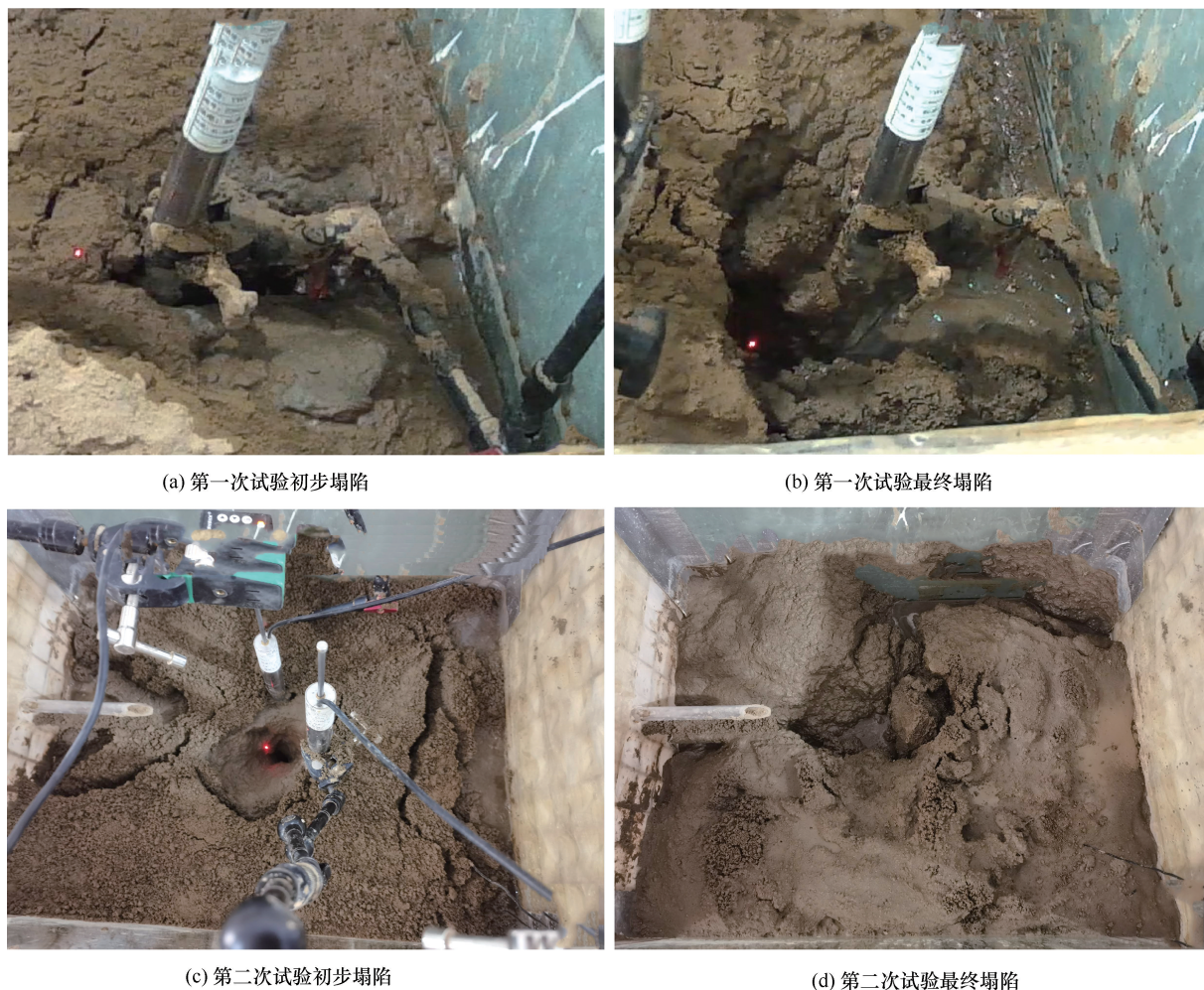


图 8 新生街土层塌陷示意

Fig. 8 Diagram of Soil Collapse in Xinsheng Street

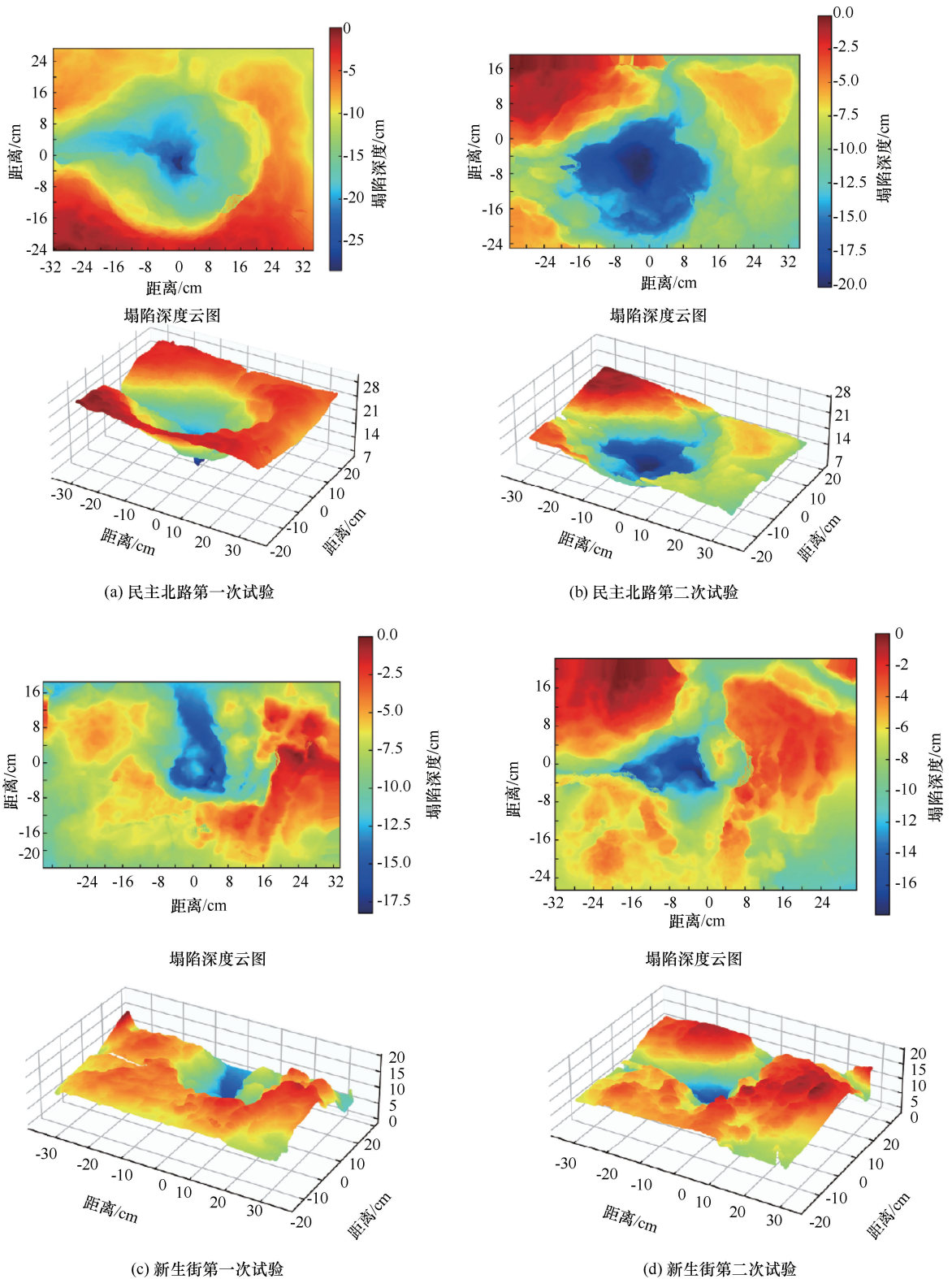


图9 三维激光扫描示意

Fig. 9 Schematic diagram of 3D laser scanning

范围比新生街塌陷范围要大一些, 形成该现象的主要原因在于两种工况最终塌陷形态都为“沙漏型”塌陷且民主北路土层的土层厚度比新生街土层的土层厚度要大, 所以民主北路土层的塌陷范围比新生街土层

塌陷范围要大, 塌陷深度要深一些。

### 3.2 土体变形特征分析

潜蚀作用下土体变形特征分为3个阶段, 第一阶段为土体遇水沉降阶段, 该阶段土体遇水之后发生沉降

变形, 产生裂缝, 为潜蚀提供条件; 第二阶段为土洞发育阶段, 在水力梯度的作用下, 土颗粒被地下水携带流向岩溶裂隙, 随着土颗粒的流失, 岩溶裂隙上方产生空洞; 第三阶段为土体塌陷阶段, 土体下方的土洞扩大到一定程度时, 土体遇水增重后, 当土颗粒之间的剪切力小于土颗粒加上孔隙水的重力时, 塌陷发生, 随着潜蚀持续发生, 塌陷也会逐渐扩大直至极限。

土体纵向位移可反映出土体沉降、流失及塌陷趋势, 如图 10(a) 所示, 民主北路土层第一次试验中, 在试验开始初期土体纵向位移并没有太大改变, 在 0~10 min 时都处于土体遇水沉降阶段, 该阶段松散的土体遇水开始沉降、出现裂缝, 其纵向位移变化较小; 10~13 min 期间土体有一段小的沉降, 5 cm、15 cm 深位移都有变化, 说明土层下方有土颗粒流失,

潜蚀发生, 该阶段为土洞发育阶段; 13~30 min 期间土体开始塌陷, 表面、5 cm、15 cm 深位移突然增大, 而表面位移在 15 min 后一直波动, 出现这种情况, 因上方土体吸水后产生增重效应, 致塌力超过抗塌力, 不断塌陷掉落在塌陷坑内, 在 15 min 后 5 cm、15 cm 深位移不再有突变, 说明 15 min 后, 下方土洞在塌陷后被充填, 土颗粒只能顺着地下水渗流缓缓流失, 导致 5 cm、15 cm 深位移变化不显著, 该阶段为土体塌陷阶段。如图 10(b) 所示, 民主北路土层第二次试验与第一次试验相似, 0~10 min 为土体遇水沉降阶段, 10~18 min 为土洞发育阶段, 18~50 min 为土体塌陷阶段。

如图 11(a) 所示, 新生街土层第一次试验在试验开始初期 0~13 min 期间土体纵向位移无明显变化, 此阶段为土体遇水沉降阶段; 13~18 min 期间, 5 cm

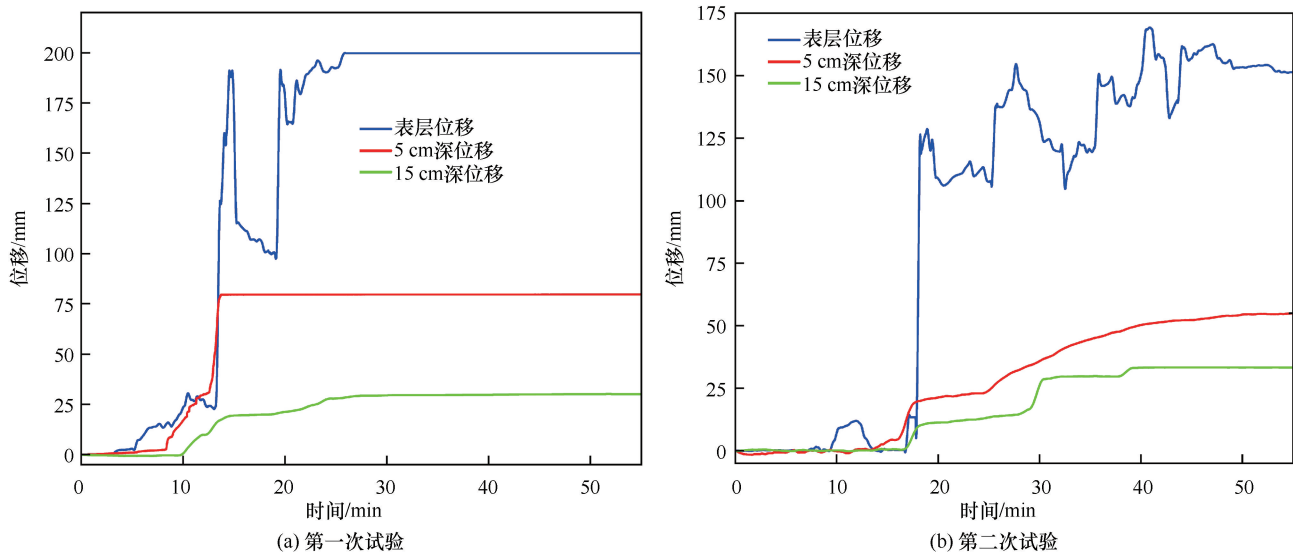


图 10 民主北路纵向位移曲线

Fig. 10 Longitudinal displacement curve of Minzhu North Road

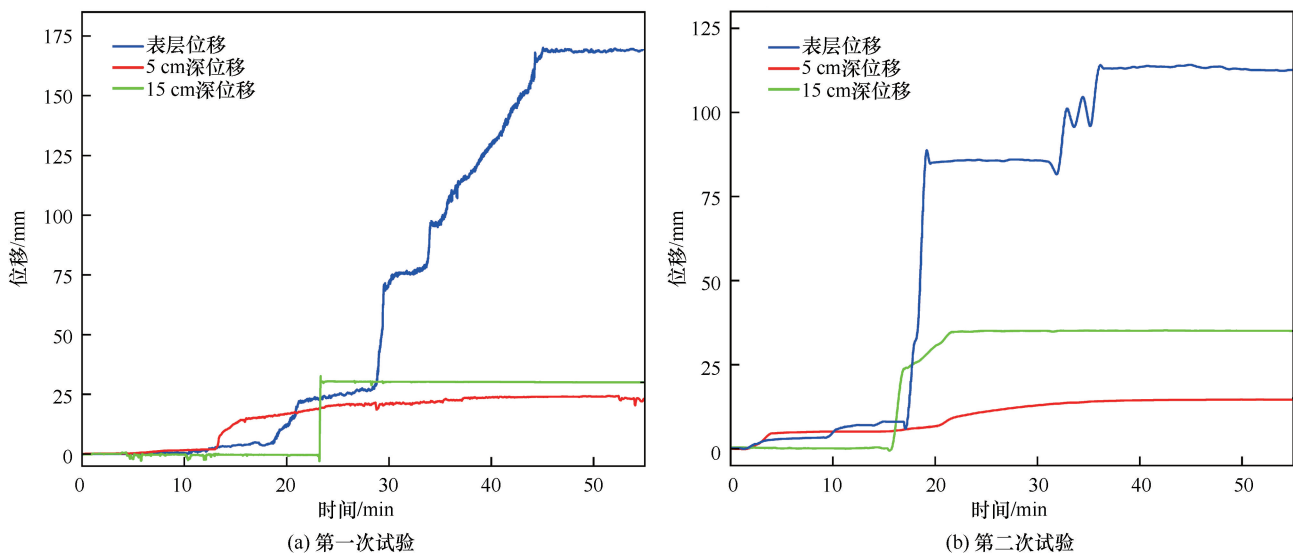


图 11 新生街土层纵向位移曲线

Fig. 11 Longitudinal displacement curve of soil layer in Xinsheng Street

深土体位移开始有较大位移, 说明土颗粒已经开始流失, 潜蚀已经开始。新生街土层为主要为粉砂土, 其黏聚力较低, 土颗粒流失后形成的土洞还未完全发育, 就被上方土体填充, 5 cm 深位移曲线才有如此明显变化, 该阶段为土洞发育阶段; 18~45 min 期间表层位移曲线开始有明显变化, 塌陷开始发生, 表面位移曲线呈阶梯上升状, 位移不断增大, 没有减小, 说明该塌陷为“沙漏型”塌陷, 土体如沙漏一般一直向下方岩溶裂隙流失, 而不是由上方土体支撑不住掉落形成的塌陷。在 23 min 时, 15 cm 深位移曲线发生突变, 出现这种情况, 说明之前土颗粒流失范围主要在 5~15 cm 深之间的土体, 15 cm 深下方的土颗粒流失较少, 当 15 cm 深下方土颗粒流失形成的土洞被填充时, 15 cm 深位移曲线发生突变, 该阶段为土体塌陷阶段。如图 11(b) 所示, 新生街土层第二次试验与第一次试验相似, 0~13 min 为土体遇水沉降阶段, 13~16 min 为土洞发育阶段, 16~40 min 为土体塌陷阶段。

对比民主北路土层与新生街土层表层位移曲线, 发现民主北路土层表层位移曲线在塌陷发生后会出现上下波动现象, 新生街土层表层位移曲线在塌陷后则是呈阶梯状向上位移。表层位移曲线有此现象和其土层性质造成不同的塌陷类型有关, “土洞型”塌陷与“沙漏型”塌陷的特点造成了表层位移曲线的不同。

民主北路土层 5 cm 深位移曲线在 15 cm 深位移曲线之上, 新生街土层则相反, 出现该现象是因民主北路土层由“土洞型”塌陷扩展为“沙漏型”塌陷形成, 扩展为“沙漏型”塌陷过程中 5 cm 深下方土体会因重力作用掉落填充到土洞中, 5 cm 深位移发生较大变化。新生街土层是因其土层性质形成的“沙漏型”塌陷, 土颗粒一直由下至上向下流失, 导致下方土体一直变形, 传到上方土体时, 土体形变就比较小了。

### 3.3 潜蚀速率与土体表面沉降变化分析

研究潜蚀与塌陷的关系就要研究潜蚀速率与土体表面沉降的变化, 潜蚀速率与土体表面沉降变化有一定的规律, 潜蚀速率与每秒流失的土质量有关, 每秒流失的土质量由每个阶段流出泥水烘干后得出土的质量占比得出。民主北路与新生街土层潜蚀速率与表层位移曲线如图 12 所示, 可发现在土体表面发生沉降前, 潜蚀速率会明显的变快, 潜蚀速率有较大波动或突然增大时, 表层位移也会有相应波动与位移。如图 12(c)(d) 所示, 在土洞发育阶段, 潜蚀速率越快, 塌陷时表层位移曲线变化越剧烈。潜蚀速率变快, 土颗粒流失速率变快, 土体沉降有较大变化, 潜蚀速率和土体沉降变化有较紧密关联。可根据潜蚀速率的变

化来推测土体沉降变化的依据, 潜蚀速率有较大幅度增大后, 一段时间内土体沉降或塌陷的几率会变大。潜蚀速率若稳定不变, 长时间潜蚀后, 流失的土颗粒足够多, 土体也会发生沉降或塌陷。

### 3.4 土体颗粒级配对比分析

通过对比潜蚀后流失土颗粒的填筑土、通过管道流出的土颗粒与填筑土颗粒级配的关系, 研究潜蚀作用下三者颗粒级配的关系, 其中潜蚀后流失土颗粒的填筑土颗粒级配为 4 次试验后平均颗粒级配, 通过管道流出的土颗粒级配为相同土层的 2 次试验求得的平均颗粒级配。

如图 13 所示, 流失土颗粒的填筑土颗粒级配曲线在填筑土的颗粒级配曲线之下, 说明潜蚀后流失土颗粒填筑土的颗粒级配大于填筑土的颗粒级配, 有大量小粒径土颗粒通过大粒径土颗粒的间隙流失, 通过岩溶管道排泄而出; 民主北路、新生街土层流出土颗粒的颗粒级配曲线均在填筑土之上, 说明通过管道流失的土颗粒大都为细小颗粒, 整体颗粒级配比填筑土要小。

出现该现象的原因是: 土体中的粒径较大的土颗粒为支撑土体的骨架, 粒径较小的土颗粒是可以在较大土颗粒之间的空隙中移动的, 当受到渗流力作用时细颗粒可以跟随地下水流动在粗颗粒形成的孔隙之间自由移动而不承担力的作用, 所以通过管道流失的土颗粒的颗粒级配普遍偏小, 原土层中留下粒径较大的粗颗粒。

其中民主北路流出土颗粒级配曲线在新生街流出土颗粒级配曲线之上, 颗粒级配整体要小, 出现这个现象是因民主北路土层粉砂土土层比新生街粉砂土土层要薄, 整体颗粒级配较小, 流出土样整体颗粒级配也会更小。

## 4 讨论

本文通过自主设计潜蚀致塌物理试验装置, 考虑了潜蚀作用下不同覆盖层对覆盖型岩溶塌陷的影响, 定量研究了徐州废黄河区域潜蚀作用下覆盖型岩溶塌陷的演化特征、土体变形特征、潜蚀速率以及土体颗粒级配的变化。前人大多研究产生岩溶塌陷的条件、影响因素与岩溶塌陷的形成机制等, 并没有采用物理模型试验对废黄河区域岩溶塌陷的形成进行定量研究, 这不利于徐州废黄河区域岩溶塌陷研究的开展。

本文也存在以下不足: (1) 在对岩溶塌陷的影响因素方面, 只考虑了不同覆盖层一种影响因素进行试验, 对于不同裂隙大小、降雨条件以及下方岩溶水

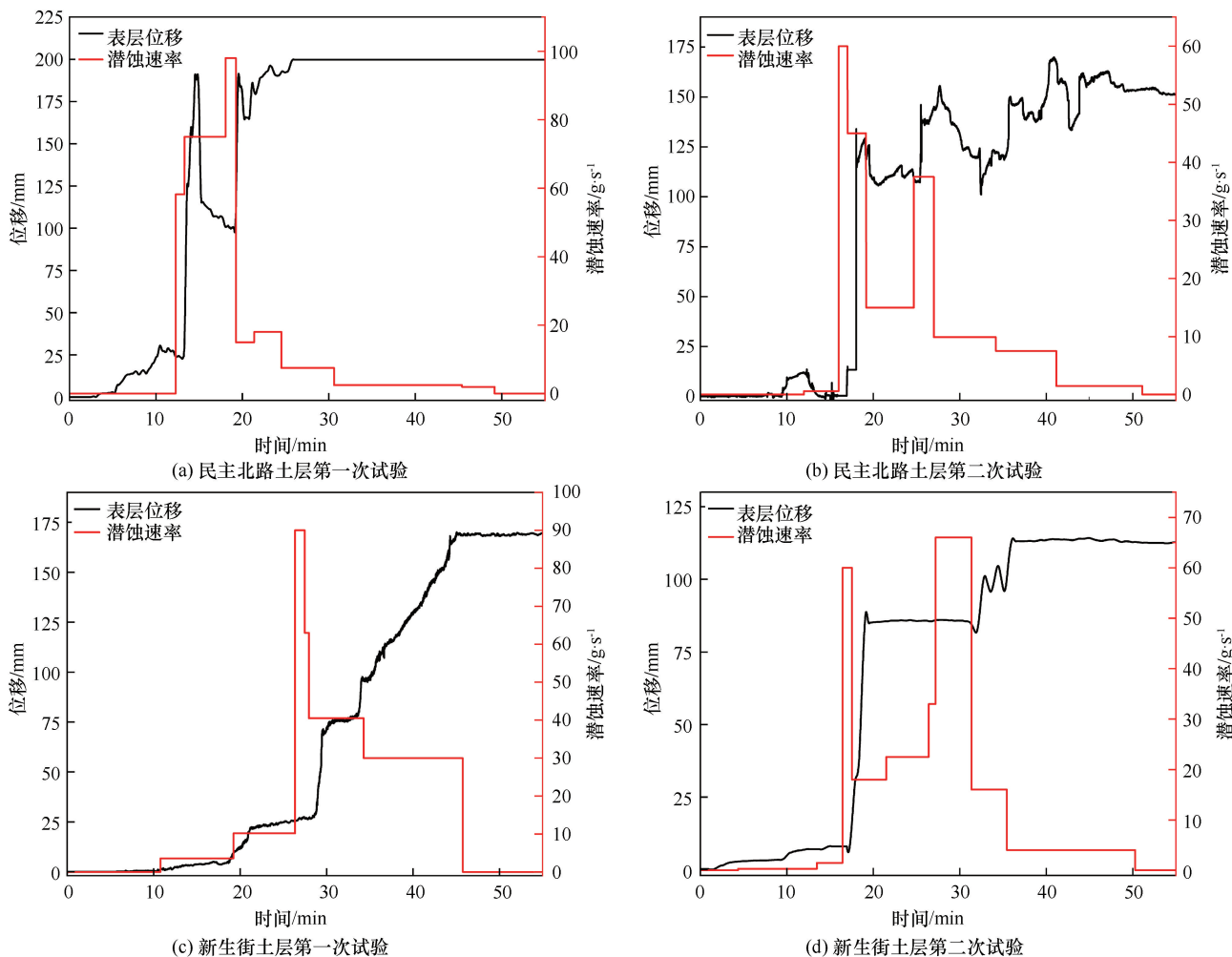


图 12 潜蚀速率与表面位移曲线

Fig. 12 Suffosion erosion rate and surface displacement curve

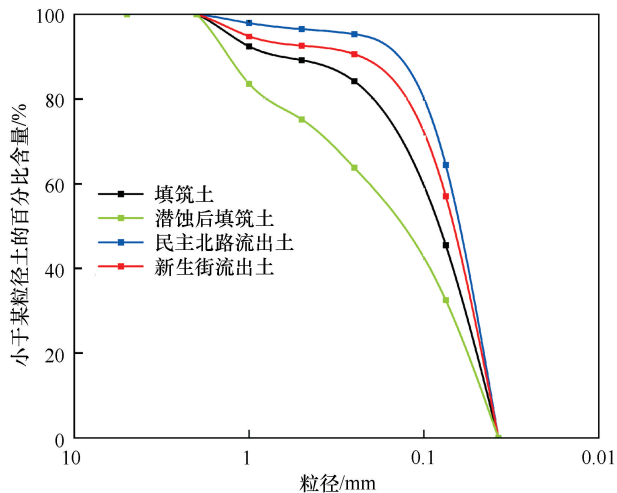


图 13 颗粒级配曲线

Fig. 13 Particle size distribution curve

位的波动对潜蚀作用下覆盖型岩溶塌陷的影响尚未考虑。(2)本文采用的物理模型在尺寸和监测手段上存在一定局限性,未能完全模拟该地区塌陷形成的全过

程。未来可以通过构建更大规模的物理模型,并引入更多先进的监测设备(如分布式光纤传感器、高精度激光位移计等),全面获取不同位置土层的沉降变形特征及时空演化规律,进一步验证和完善潜蚀作用下岩溶塌陷的机理。

当前,覆盖型岩溶塌陷的物理模型试验研究仍存在诸多亟待完善之处。具体而言,针对不同裂隙尺度、降雨条件以及大尺寸模型试验等关键因素对覆盖型岩溶塌陷机理的影响,仍需开展更为深入系统的研究。通过优化试验设计,提升模型试验的精度与可靠性,从而更真实、全面地揭示覆盖型岩溶塌陷的时空演化规律,为岩溶塌陷地质灾害的防治提供坚实的理论基础和科学依据。

## 5 结论

本文通过物理模型试验研究了在潜蚀作用下覆盖型岩溶塌陷的演化特征,分析了试验过程中土体变形特征、潜蚀速率与土体表面沉降变化、土体颗粒级配

对比, 总体上获得了如下认识。

(1) 民主北路土层是由最开始的“土洞型”塌陷演化为“沙漏型”塌陷, 新生街土层从始至终为“沙漏型”塌陷, 且塌陷坑的范围与土层厚度有关, 土层越厚, 塌陷范围越大。

(2) “土洞型”塌陷扩展发育成“沙漏型”塌陷位移曲线呈波动向上型, “沙漏型”塌陷的表层位移曲线呈阶梯向上型。

(3) 潜蚀致塌过程中, 潜蚀速率越快, 土颗粒流失速率变快, 土体沉降量越大, 潜蚀速率在土体塌陷过程中起主导作用。

(4) 潜蚀过程中, 土层颗粒级配越大管道流出土颗粒级配越大, 反之亦然。

## 参考文献 (References):

- [1] JIA Long, MENG Yan, LI Lujuan, et al. A multidisciplinary approach in cover-collapse sinkhole analyses in the mantle karst from Guangzhou City (SE China) [J]. *Natural Hazards*, 2021, 108: 1389-1410.
- [2] 蒋学广. 云南省丘北县温浏集镇区岩溶塌陷成因分析与防治 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2024, 35 (3): 18-25.  
JIANG Xueguang. Analysis on the causes of karst collapse and its control methods in Wenliuji town, Qiubei county, Yunnan province [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment*, 2024, 35(3): 18-25.
- [3] 周正, 李大华, 廖云平, 等. 重庆中梁山岩溶地面塌陷特征及形成机理 [J]. *中国岩溶*, 2022, 41 (1): 67-78.  
ZHOU Zheng, LI Dahua, LIAO Yunping, et al. Characteristics and formation mechanism of karst ground collapse in Zhongliangshan area, Chongqing [J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 67-78.
- [4] 韩庆定, 罗锡宜. 广东佛山市高明区李家村岩溶塌陷群成因机理分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32 (4): 56-64.  
HAN Qingding, LUO Xiyi. Analysis on the formation mechanism and development process of karst collapses in Lijia Village, Gaoming District of Foshan City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 56-64.
- [5] 缪世贤, 黄敬军, 武鑫, 等. 徐州岩溶地质调查及其发育特征分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44 (2): 172-177.  
MIAO Shixian, HUANG Jingjun, WU Xin, et al. Karst geological survey and analysis of its development characteristics in Xuzhou [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2): 172-177.
- [6] 魏永耀, 孙树林, 黄敬军, 等. 徐州岩溶塌陷时空分布规律及成因分析 [J]. *中国岩溶*, 2015, 34 (1): 52-57.  
WEI Yongyao, SUN Shulin, HUANG Jingjun, et al. Spatial-temporal distribution and causes of karst collapse in the Xuzhou area [J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34 (1): 52-57.
- [7] 罗小杰, 沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望 [J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 101-111.  
LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of karst

- ground collapse in China [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37 (1): 101-111.
- [8] 陈孝轩, 席丹妮. 岩溶地面塌陷成因及演化规律分析 [J]. *矿产勘查*, 2024, 15 (S1): 428-437.  
CHEN Xiaoxuan, XI Danni. Analysis of the cause and evolutionary law of rock-soluble ground collapse [J]. *Mineral Exploration*, 2024, 15 (S1): 428-437.
- [9] ZHANG Boyang, LIU Gang, LI Yingchun, et al. Experimental study on the seepage mutation of natural karst collapse pillar (KCP) fillings over mass outflow [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(51): 110995-111007.
- [10] JIANG Xiaozhen, DAI Jianling, ZHENG Zhiwen, et al. An overview on karst collapse mechanism in China [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2024, 39(3): 71.
- [11] LEI Mingtang, ZHOU Wanfang, JIANG Xiaozhen, et al. Karst collapses and their formations [M]//LEI Mingtang, ZHOU Wanfang, JIANG Xiaozhen, et al. *Atlas of Karst Collapses*. Cham: Springer International Publishing, 2022: 1-18.
- [12] BENDAHMANE F, MAROT D, ALEXIS A. Experimental parametric study of suffusion and backward erosion [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2008, 134(1): 57-67.
- [13] 张卜平, 朱兴华, 成玉祥, 等. 黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6): 41-52.  
ZHANG Buping, ZHU Xinghua, CHENG Yuxiang, et al. A review on loess subsurface-erosion mechanism and its hazard effects [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32 (6): 41-52.
- [14] 范士凯. 武汉(湖北)地区岩溶地面塌陷 [J]. *资源环境与工程*, 2006(S1): 608-616.  
FAN Shikai. A discussion on karst collapses in Wuhan (Hubei) [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2006(S1): 608-616.
- [15] 陶小虎, 赵坚, WANG Xiaoming, 等. 地下水位变化对透-阻型岩溶塌陷影响的分析 [J]. *中国岩溶*, 2017, 36(6): 777-785.  
TAO Xiaohu, ZHAO Jian, WANG Xiaoming, et al. Analysis of seepage effect on the formation of sinkhole in unconfined aquifer-aquitard system caused by groundwater changes [J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 777-785.
- [16] 罗小杰, 罗程. 岩溶地面塌陷三机理理论及其应用 [J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 171-188.  
LUO Xiaojie, LUO Cheng. Three-Mechanism Theory (TMT) of karst ground collapse and its application [J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40 (2): 171-188.
- [17] 康彦仁. 论岩溶塌陷形成的致塌模式 [J]. *水文地质工程地质*, 1992, 19(4): 32-34.  
KANG Yanren. Collapse-causing models in karstic collapse process [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1992, 19(4): 32-34.
- [18] 王平, 张彦文, 俞栋华, 等. 不同土层结构下覆盖型岩溶塌陷试验研究 [J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(10): 100-109.  
WANG Ping, ZHANG Yanwen, YU Donghua, et al. Experimental study on covered karst collapse under different soil layer structures [J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(10): 100-109.
- [19] SONG Yuqi, RANJITH P G, WU Bailin, et al. A microscopic study

- of sand arches and sand skeletons under hydrodynamic force based on the CFD-DEM model [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 92: 104017.
- [20] 李京天, 朱凯, 肖先焯, 等. 水位下降诱发覆盖型岩溶塌陷发育机理[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(2): 406-420.  
LI Jingtian, ZHU Kai, XIAO Xianxuan, et al. Development mechanism of covered karst collapses induced by groundwater drawdown[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(2): 406-420.
- [21] ZHOU Haotong, LIU Changqing, WANG Guihe, et al. Study on drilling ground collapse induced by groundwater flow and prevention based on a coupled CFD-DEM method [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(5): 2112-2125.
- [22] 洪儒宝, 简文彬, 陈雪珍. 覆盖型岩溶土洞对地下水升降作用的响应及其塌陷演化过程研究[J]. *工程地质学报*, 2023, 31(1): 240-247.  
HONG Rubao, JIAN Wenbin, CHEN Xuezen. Study on response of covered karst soil cave to groundwater changes and its collapse evolution process [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(1): 240-247.
- [23] 张晓宸, 陈学军, 唐灵明, 等. 水位波动条件下岩溶土洞塌陷的模型试验[J]. *桂林理工大学学报*, 2022, 42(3): 593-599.  
ZHANG Xiaochen, CHEN Xuejun, TANG Lingming, et al. Model test of karst soil cave collapse under water level fluctuation [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2022, 42(3): 593-599.
- [24] 郭思源, 苏永华, 刘煌海, 等. 地下水位线倾斜的地面塌陷演化过程试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(5): 1774-1785.  
GUO Siyuan, SU Yonghua, LIU Huanghai, et al. Experiments on collapse evolution process of karst stratum with inclined groundwater level [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(5): 1774-1785.
- [25] CHEN Xuejun, XUE Mingming, SONG Yu. Analysis of the influence of groundwater level fluctuation on karst soil cave collapse [J]. *Geofluids*, 2023, 2023(1): 7540561.
- [26] LIU Xingzong, CHEN Hongkai, GONG Bin, et al. Formation process of cover collapse sinkholes related to groundwater level decline in karst areas [J]. *Journal of Mountain Science*, 2024, 21(11): 3832-3846.
- [27] 熊彩霞, 刘沂轩. 徐州市区地面塌陷与岩溶水开采关系研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2009, 20(1): 80-82.  
XIONG Caixia, LIU Yixuan. Relation of surface collapse and karst water exploitation in urban area of Xuzhou City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2009, 20(1): 80-82.
- [28] 邢雪, 周丹, 罗跃. 江苏徐州岩溶塌陷及其防治对策[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2014, 25(4): 51-58.  
XING Xue, ZHOU Dan, LUO Yue. Study on geological disasters of karst collapse in Xuzhou and its protection measures [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2014, 25(4): 51-58.
- [29] 黄敬军, 崔龙玉, 武鑫, 等. 徐州废黄河断裂带对岩溶塌陷的控制作用[J]. *中国地质*, 2019, 46(2): 389-397.  
HUANG Jingjun, CUI Longyu, WU Xin, et al. The control of the old (abandoned course of) Yellow River fault zone in Xuzhou on the karst collapse [J]. *Geology in China*, 2019, 46(2): 389-397.
- [30] 武鑫, 王艺霖, 黄敬军, 等. 江苏徐州地区岩溶塌陷致塌力学模型及水位控制红线[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(2): 67-77.  
WU Xin, WANG Yilin, HUANG Jingjun, et al. Mechanical model of karst collapse and red line of groundwater level of Xuzhou Region in Jiangsu Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 67-77.

(责任编辑 王海锋)