

李卓骏,蒙彦,董志明,等.土洞型岩溶塌陷发育过程气体示踪试验研究:以广州金沙洲为例[J].中国岩溶,2021,40(2):238-245.
DOI:10.11932/karst2021y18

土洞型岩溶塌陷发育过程气体示踪试验研究 ——以广州金沙洲为例

李卓骏^{1,2},蒙彦¹,董志明³,贾龙¹,潘宗源¹,管振德¹,周富彪¹

(1. 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 中国地质调查局岩溶塌陷防治技术创新中心, 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 华杰工程咨询有限公司, 北京 100029)

摘要:运用气体示踪进行土洞型岩溶塌陷监测预警是一种比较新的技术方法,其原理是通过气体在不同形状、规模的土体孔隙、裂缝和土洞中的运移规律研究,分析气体特征值与土体变形破坏的关系,进而间接判断土洞的发育情况,实现岩溶塌陷监测预警。本文以广州市金沙洲岩溶塌陷区为例,通过室内物理模型试验再现了土洞发育、形成到地面塌陷的全过程。运用气体示踪技术,按照土洞形成、土洞发育、土洞堵塞、土洞扩大和土洞塌陷五个过程,研究气体浓度、气体聚集时间等参数指标与土洞不同发育阶段的关系。结果表明:①土洞型岩溶塌陷发育程度与示踪气体浓度存在对应关系,气体浓度升高反映了土体变形破坏的进一步发育;②土体变形破坏程度与示踪气体浓度总体呈正相关关系,距离地面塌陷点越近浓度越高;③土体变形破坏程度与示踪气体浓度达到峰值浓度时间存在对应关系,距离地面塌陷点越近,气体浓度达到峰值的时间越快。根据以上试验结果,运用气体示踪技术进行土洞型岩溶塌陷监测预警是可行的,后期应探索预警阈值并进行野外现场实际验证。

关键词:岩溶塌陷;模型试验;气体示踪;监测预警;广州金沙洲

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2021)02-0238-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶塌陷^[1]是我国岩溶区常见的地质灾害之一,根据全国岩溶塌陷地质灾害调查成果,我国有记录的岩溶塌陷为3 300余处,主要分布在珠三角、湘中、桂中等地的岩溶强发育和工程活动密集区,社会影响和经济损失巨大^[2]。岩溶塌陷一般可分为土洞和基岩塌陷两种类型。土洞型岩溶塌陷区分布广、数量多,如何对其进行监测预警一直是人们重点关注

的问题。

对于土洞型岩溶塌陷,前人先后运用地下水水力条件监测^[3-4]、地球物理探测^[5]、岩土体变形监测^[6-10]等多种监测手段,在一定程度上实现了预警。但是,由于岩溶塌陷极具隐蔽性和突发性,且监测手段不能对土体产生二次破坏,因此,在预警效果上还不是理想。前人的研究结果也表明,开展多参数监测是提高预警精度的有效手段^[11]。

基金项目:国家自然科学基金项目(41877300, 41302255);广西重大科技创新基地建设项目(岩溶动力学重点实验室建设);社会服务项目(峰丛地貌岩溶区绿色公路特长隧道建设关键技术);中国地质调查项目(1212011220192, DD20190266);广西基金项目(2018GXNSFAA294020);国家基本科研业务项目(川藏铁路长大深埋隧道岩溶及高压岩溶水评估)

第一作者简介:李卓骏(1995—),男,硕士研究生,研究方向为岩溶地质灾害监测预警。E-mail:logan—work@foxmail.com。

通信作者:蒙彦(1978—),男,博士,研究员,长期从事岩溶地质灾害与工程安全研究工作。E-mail:karstmy@139.com。

收稿日期:2020-10-20

在实施全国岩溶塌陷地质灾害专项调查的过程中,新发现隐伏土洞200余处^[12],其主要分布在城市建筑和人口密集区,潜在威胁巨大,如何对这些土洞进行有效监测预警是防灾减灾迫切需要解决的技术难题。调查发现,这些土洞中均储存了大量气体,且气体随着土洞的不同发展阶段在浓度、成分、通量、地球化学特征等方面均会发生明显变化,并在地面显现异常^[13]。比如在广州金沙洲塌陷区,研究证明岩溶塌陷的形成、发育与地下水水动力条件改变有着直接的关系^[14],但是仅依靠地下水动力条件监测来判断土洞发育程度和塌陷发生位置仍存在许多不足,特别是当地下水在土洞发育位置以下波动时。为此,前人还采用地质雷达探测法^[15-16]、光纤传感监测法^[17-18]等进行监测预警,但在预警精度方面仍有待提高。在广州金沙洲岩溶塌陷区,已有人利用气体分析法对岩溶塌陷发育进行探索性研究,证明氦气浓度与岩溶塌陷的形成存在着一定的关联^[19]。因气体较液体更易扩散,故已广泛应用于管道检漏、矿区采空区漏风检测等^[20]。在土洞的形成发育过程中,随着土体中的孔隙、裂隙和裂缝等结构面的贯通,原来聚集于岩溶管道或土洞内的密度较轻气体必然会沿着贯通的结构面向地表扩散,进而在地表形成气体异常,这为利用气体示踪进行土洞型岩溶塌陷监测预警提供了可能。

本文以广州金沙洲岩溶塌陷区为例,通过室内物理模型试验再现土洞型岩溶塌陷发育形成的全过程,并运用气体示踪技术,探索土洞发育的不同阶段与气体浓度、气体峰值聚集时间的关系,验证气体示踪技术在土洞型岩溶塌陷监测预警中的可行性,为下一步开展预警阈值研究和野外实地验证奠定理论基础。

1 研究区概况

金沙洲隶属于广州市白云区,位于广花盆地南部,毗邻佛山市,交通条件便利,地理位置优越。金沙洲属浅覆盖型岩溶区^[21],第四系覆盖层厚度10~30 m,为单层、双层或多层结构。区内下伏碳酸盐岩主要为石炭系石磴子组和壶天组灰岩,岩溶发育中等至强烈,钻孔线岩溶率6.4%~58.8%。金沙洲四面环水,具有独立的水文地质单元,区内地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水和碳酸盐岩裂隙溶洞水,水量中等至丰富,地下水自然水位变幅1.0~

1.4 m。2007年,由于金沙洲隧道施工引发地下水剧烈波动,最大水位降深达到18 m,由此引发了20余起岩溶塌陷^[22],后经防治处理,岩溶塌陷数量逐渐减少。由于土体受到前期扰动,很多区域仍存有大量土洞,存在安全隐患。据调查,区内88%以上的土洞发育于灰岩面以上的粉质黏土层,有少量分布于砂土层和淤泥层^[23-24]。

2 室内模拟试验设计

2.1 试验装置

模拟试验装置根据金沙洲土洞发育柱状图(图1)及地下水动力条件按照相似比例设计,全高5.5 m,可模拟不同管道形态、不同水位波动情况下土体的变形破坏、形成土洞、地表形成塌陷的全过程,同时配合外接的气体示踪装置,实现土洞不同发育阶段的气体示踪试验。

模拟试验装置主体材料为透明有机玻璃(图2),分为模型箱、水箱、岩溶管道模拟部分、地下抽水模拟部分。气体示踪试验装置为外接设备,通过岩溶管道的开关与模拟试验装置连接。

2.2 试验方法

本次试验主要目的是通过室内物理模型试验再现岩溶塌陷的全过程,并使用示踪气体进行土洞不同发育阶段的气体示踪试验,旨在发现气体浓度、气体峰值聚集时间等指标参数与土洞发育的关系,验证采用气体示踪方法进行岩溶塌陷监测预警的可行性。

模拟试验时,通过在岩溶管道内定时定量释放示踪气体,同时在模型试验箱顶部对土体表面的示踪气体浓度进行监测,并实时采集数据进行分析。同时通过对地下水浑浊度监测等方法了解土体变形破坏情况,划分土洞不同发育阶段;最后建立气体浓度等特征值变化与土洞不同发育阶段的对应关系,分析气体特征值异常对岩溶塌陷发育的指征作用。

2.3 实验过程

2.3.1 示踪剂选择

选择土洞气体示踪剂应遵循以下原则:①示踪剂在试验环境中本底值很低;②示踪剂性质稳定,不

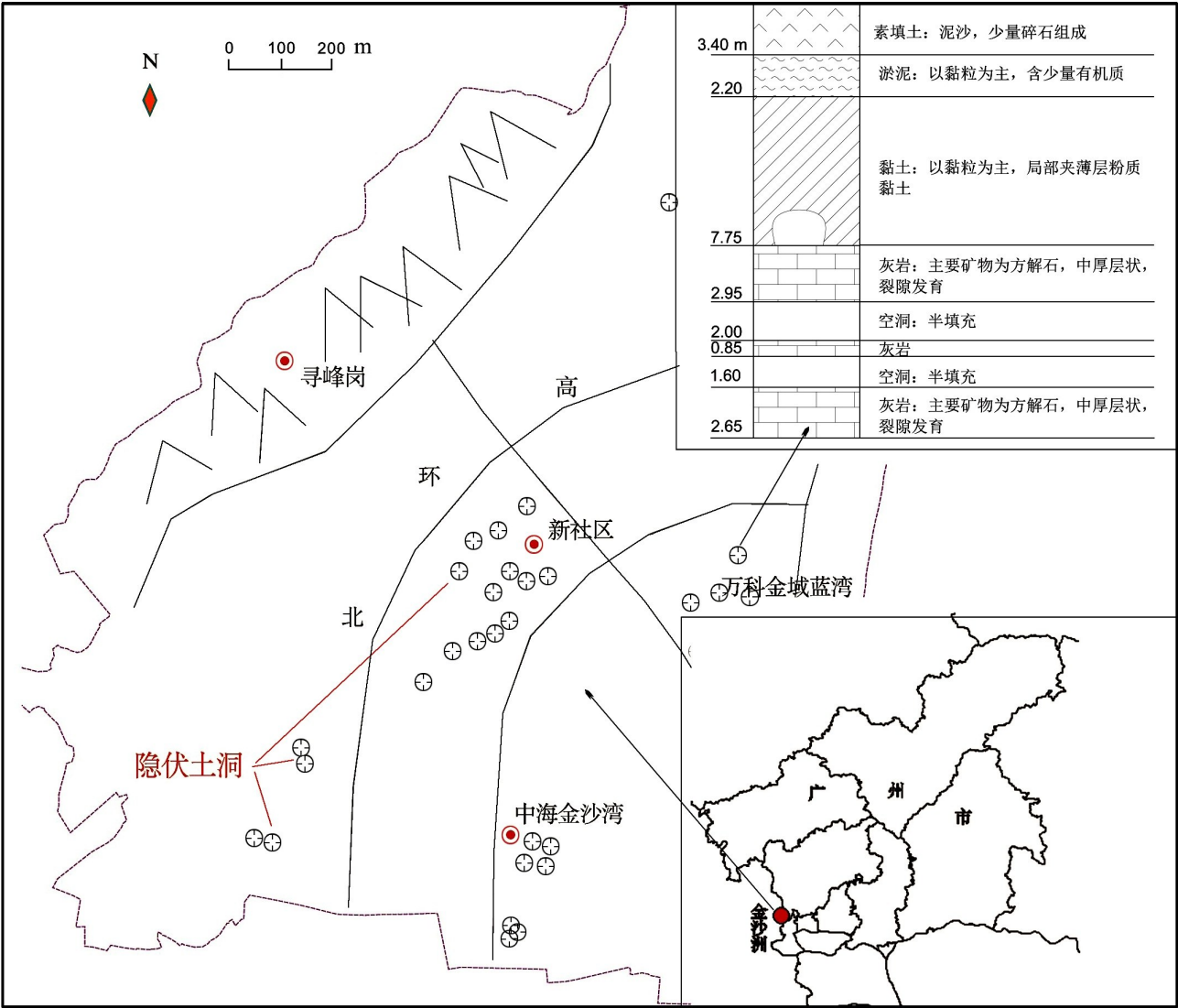


图1 研究区位置及典型土洞柱状图

Fig. 1 location of study area and typical sinkhole histogram



图2 实验装置照片及示意图

Fig. 2 photo of experimental equipment and sketch map

1—模型箱 2—水箱 3—岩溶管道模拟部分 4—地下抽水模拟部分

易自发产生反应;③示踪剂不与实验环境发生反应。本次试验结合气体、试验设备安全性、经济性、可靠性等多种需求,选用氦气(He)作为示踪气体。氦气属于惰性气体,性质稳定且可自行向上方运动;而相关气体检测仪可实现0~100%VOL监测,满足试验需求。

2.3.2 塌陷模拟及气体示踪

本次实验土样取自金沙洲土洞实际开挖剖面的扰动土样,取土位置为土洞发育数量最多的粉质黏土层(图1)。装入试验箱前需对土样进行预处理,使得装箱后的土样在物理力学参数方面与野外原状土样基本一致。在实验过程中,通过改变水动力条件和不同的岩溶管道形态对土箱内土体进行潜蚀破坏,同时在底部排水口安装地下水浑浊度监测仪,通过地下水浑浊度变化判断分析土体变形破坏的土洞形成、土洞发育、土洞堵塞、土洞扩大等不同阶段(图3),至地表塌陷后即停止试验。

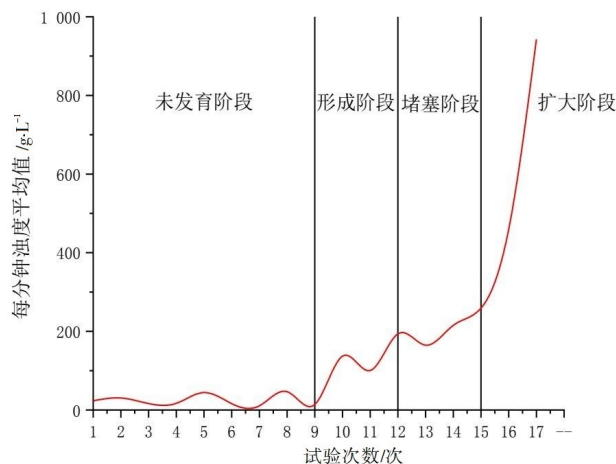


图3 实验过程地下水浑浊度变化曲线

Fig. 3 Curve of groundwater turbidity during the experiment

进行岩溶塌陷模拟试验前,需按一定的规则在试验箱土体表面布设气体监测传感器,由于示踪气体接收面为半开放环境,空气流动可能影响监测点处的示踪气体收集,产生误差,故本次试验采用分区块封闭采集的方式进行气体收集。试验共布设监测点4个(图4)。

最后,根据地下水浑浊度变化,通过外接的气体示踪装置在土洞的不同发育阶段定量释放氦气,并进行气体采集,绘制土洞不同发育阶段的气体浓度

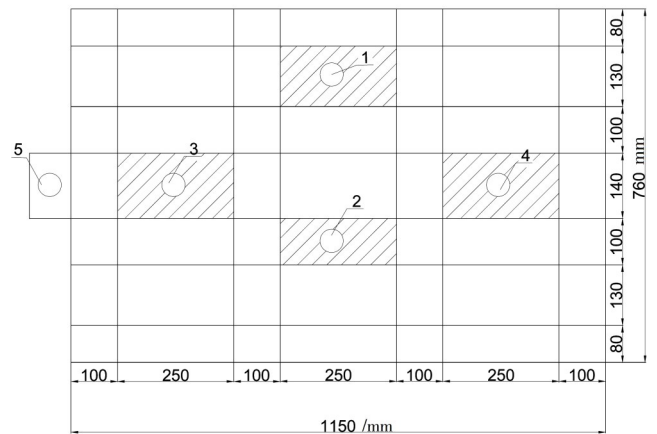


图4 示踪气体监测点布置图

Fig. 4 Layout of tracer gas monitoring points

变化曲线,分析气体浓度变化与土洞不同发育阶段的关系。

3 实验结果分析

3.1 土洞未发育阶段

实验结果表明,气体浓度变化明显的位置在监测点5(图5),正是与岩溶管道联通的监测点,气体浓度在1.1%左右,该处的气体浓度变化时间也比其他监测点长。另外4个监测点气体浓度变化幅度相对较小,大体在0.05%左右,浓度开始出现变化所需要时间也相对更长,说明此时土体并未形成气体运移通道,运移至土体顶部的气体的量较少,表明此时气体主要通过岩溶管道运移至地表。对应于地下水浑浊度曲线(图3),此阶段的地下浑浊度在15~30 g·L⁻¹左右,变化很小,主要是土样制作过程中残留在管道壁的浮土被水冲刷所致,透过透明的试验装置观察土体,未见土体被破坏。由此可见,在土洞未发育阶段,上升至地表的气体浓度总体上没有变化,除距离气体释放点较远的监测点4,气体浓度和峰值到达时间偏小外,其他气体监测点差别不大(图5)。

3.2 土洞形成阶段

此阶段的监测曲线为图7,可以看出,在整体上还是岩溶管道监测点位置5的变化占优势,但是较土洞未发育阶段的浓度有所降低,气体浓度在0.8%左右。土体表面气体监测点的气体浓度与土洞未发育阶段有了一定程度的增强,气体浓度达到0.15%左

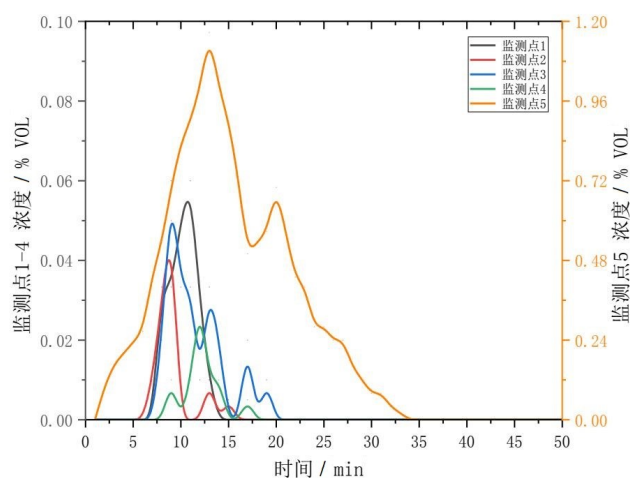


图5 土洞未发育阶段气体浓度及峰值时间变化图

Fig. 5 Variation of gas concentration and peak time in undeveloped stage

右,同时气体浓度的持续时间也明显变长,达到40分钟左右。对应于地下水浑浊度曲线(图3),此时的地下水浑浊度上升至 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,通过透明的有机玻璃观察,试验箱内的土体发生变形破坏,已形成土洞(图7),岩溶管道内的地下水也明显浑浊。

试验表明在土洞形成阶段,地表的气体浓度明显增大,通过对比监测点1-4的数据,发现监测点4的浓度变化地起、止时间相对其他点延后、提前15分钟左右,推测监测点4所在位置土体此时还是比较完整的,而监测点1和监测点3的浓度变化明显高于另外两点,推测在这两个监测点附近土体破坏应该较为严重,岩溶塌陷在监测点1、3附近发生的概率较大。

3.3 土洞堵塞阶段

随着土洞的进一步发育,土体发生坍塌挤压,导致原来形成裂缝或者扩大的孔隙变小,同时土体落入岩溶管道,造成管道局部堵塞。此阶段监测曲线表明(图8),此时,监测点位置5的气体浓度与土洞未发育阶段的气体浓度较为接近,在1.0%左右。其他4个监测点的气体浓度也有所降低,总体在0.05%左右,总体持续时间则明显缩短至15分钟,比土洞未发育阶段稍快,曲线形状也发生了明显的变化,出现了双峰曲线。

对应于地下水浑浊度曲线(图3),此阶段地下水浑浊度呈上升趋势,最大可达到 $200\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,究其原因,主要是地下水冲刷落入溶洞和岩溶管道中的坍塌土体所致,而不是土洞进一步扩大所导致的,这与地表监测点的气体浓度没有变大也基本是一致的。

3.4 土洞扩大阶段

随着试验进行,原本堵塞的进气口逐渐被疏通,土洞进一步发展,从监测曲线(图9)可以看出,监测点5的气体浓度明显下降,在0.25%左右,而其他4个监测点的气体浓度总体有所增加,距离释放点较远的监测点4的气体浓度依然最低,监测点2、3的气体浓度变得最高,且快速达到峰值(在10分钟以内),由此推测此阶段监测点1、3附近可能发生岩溶塌陷。对应于地下水浑浊度曲线(图3),此时地下水浑浊度在 $500\sim 800\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,现场可观察到地下水明显浑浊,并常常伴随着掉落的土块一起流出。可见,在土洞扩



图6 试验形成的土洞

Fig. 6 Photo of sinkhole formed by experiment

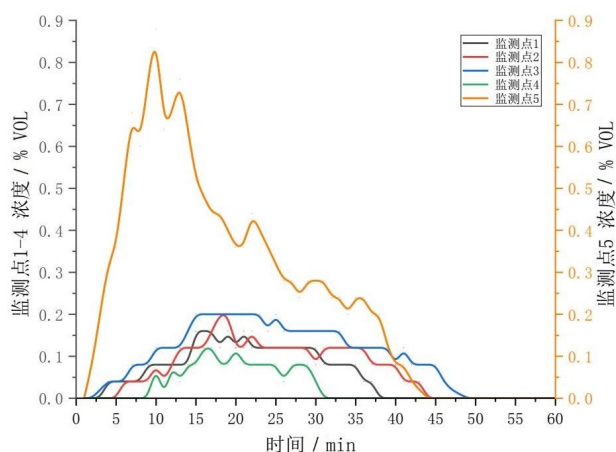


图7 土洞形成阶段气体浓度及峰值时间变化图

Fig. 7 Variation of gas concentration and peak time in formation stage

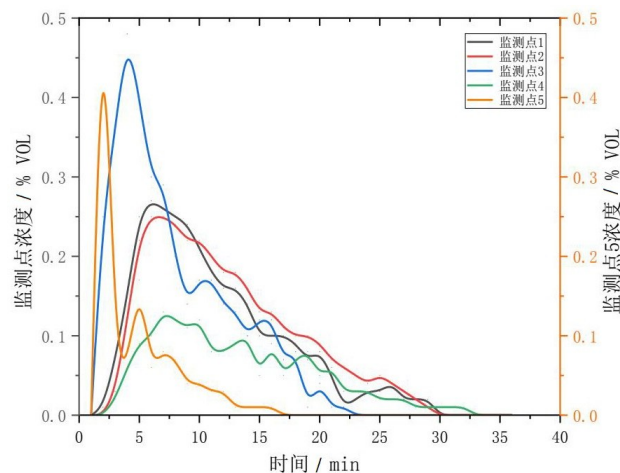


图9 土洞扩大阶段气体浓度及峰值时间变化图

Fig. 9 Variation of gas concentration and peak time in expansion stage

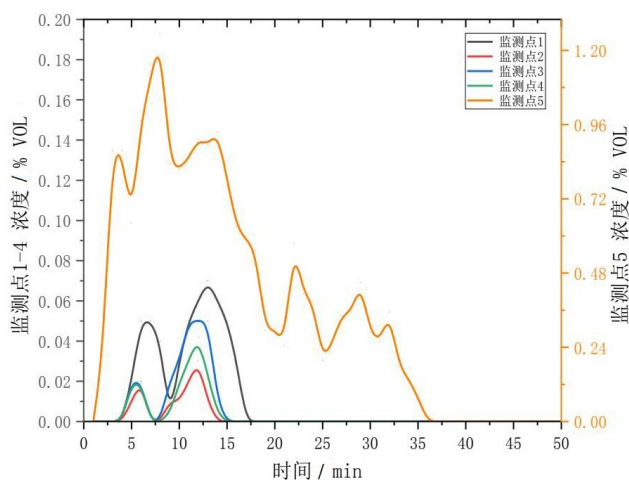


图8 土洞堵塞阶段气体浓度及峰值时间变化图

Fig. 8 Variation of gas concentration and peak time in plugging stage

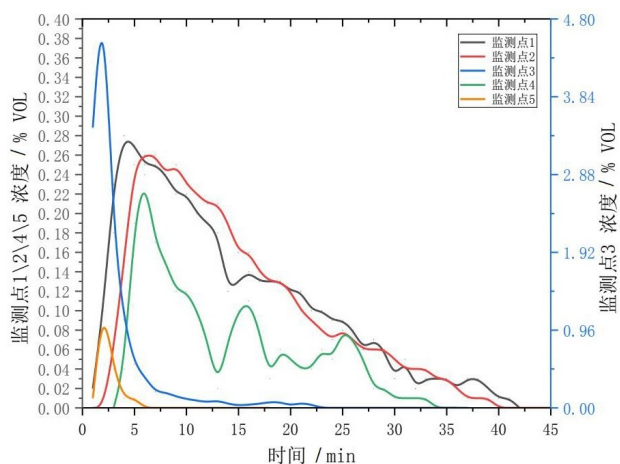


图10 土洞塌陷阶段气体浓度及峰值时间变化图

Fig. 10 Variation of gas concentration and peak time in collapse stage

大阶段,地表气体浓度曲线依然与土洞发展阶段有较好的对应关系。

3.5 土洞塌陷阶段

实验最后,在监测点1、3附近形成塌陷,与前面的推断一致。塌陷发生后,监测点5的气体浓度已经降到0.08%左右(图10),示踪气体绝大部分从塌陷处逸出,此时塌陷附近监测点3的气体浓度已达4.70%,同时塌陷点周围各点的气体浓度也相应上升,并且持续时间达40分钟左右。

3.6 塌陷位置与气体浓度关系

对土洞的不同发育阶段各个监测点的气体浓度数据进行等值线分析发现,随着土洞的发育,土层表

面的气体浓度值会形成一个浓度中心,且与塌陷的发生部位有较好的对应关系,地表气体浓度越高,说明土洞越发育,发生塌陷的概率也就越大。

4 结论

气体示踪试验证明了指示性气体在地表的气体浓度、峰值到达时间等指标参数与土洞不同发育阶段有着较好的对应关系,说明运用气体示踪技术进行土洞型岩溶塌陷监测预警是可行的,本次研究得出的主要结论如下:

(1)土洞型岩溶塌陷发育程度与示踪气体浓度存在着对应关系,气体浓度升高反映了土体变形破坏的进一步发育;

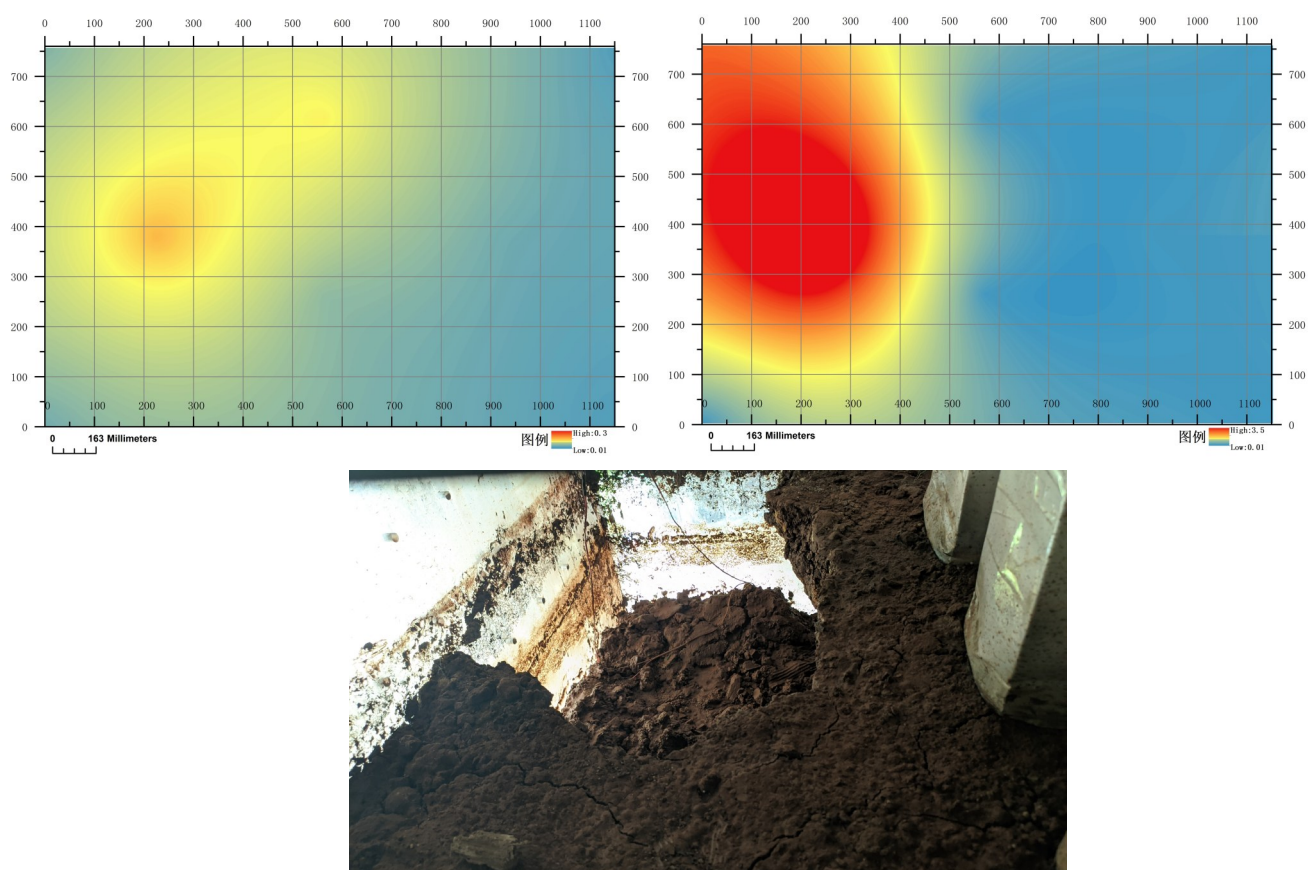


图 11 土洞不同发育阶段气体浓度等值线图(左:土洞形成阶段;右:土洞塌陷阶段)及形成的塌陷坑

Fig. 11 Contour map of gas concentration in different development stages of sinkhole (left: formation stage; right: collapse stage) and the photo of formed collapse

(2)土体变形破坏程度与示踪气体浓度总体呈正相关关系,距离地面塌陷点越近浓度越高;

(3)土体变形破坏程度与示踪气体浓度达到峰值浓度时间存在对应关系,距离地面塌陷点越近,气体浓度达到峰值的时间越短;

(4)地表气体浓度聚集程度与塌陷发生位置有较好的对应关系,通过地表气体浓度等值线分析,可以预测塌陷发生位置。

参考文献

- [1] 国家技术监督局. 岩溶地质术语(GB/T 12329—1990)[S]. 北京, 1990.
- [2] Beck B. Soil Piping and Sinkhole Failures[J]. Encyclopedia of Caves, 2012:718-723.
- [3] 雷明堂, 李瑜, 蒋小珍, 等. 岩溶塌陷灾害监测预报技术与方法初步研究:以桂林市柘木村岩溶塌陷监测为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(S1):142-146.
- [4] 高明, 蒙彦. 应用振弦式渗压计进行岩溶塌陷水压力监测的方法探讨[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(1):259-260.
- [5] 王传雷, 祁明松. 地下岩溶的地质雷达探测[J]. 地质与勘探, 1994, 30(2):58-60.
- [6] 蒙彦, 黄健民, 贾龙. 基于地下水动力特征监测的岩溶塌陷预警阈值探索:以广州金沙洲岩溶塌陷为例[J]. 中国岩溶, 2018(3):408-414.
- [7] 蒙彦, 管振德. 应用光纤传感技术进行岩溶塌陷监测预报的关键问题探讨[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2):187-192.
- [8] 覃秀玲. 岩溶土洞稳定性分析及TDR监测预警研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [9] 王目光, 魏淮, 童治, 等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. 光学学报, 2002, 22(7):867-869.
- [10] 郝文杰, 杨卓静, 张青, 等. 光纤传感技术在岩溶塌陷监测中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1):134-137.
- [11] 蒙彦. 广花盆地岩溶塌陷多参数监测预警与风险防控[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2020.
- [12] 雷明堂, 蒋小珍. 我国岩溶塌陷的现状与对策[C].//中国地质学会. 中国地质学会岩溶环境问题与对策学术研讨会论文集. 2013:17-17.
- [13] 蒋小珍. 线性工程路基岩溶土洞(塌陷)灾害防治综合研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- [14] 高明, 蒙彦. 应用振弦式渗压计进行岩溶塌陷水压力监测的方法探讨[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(1):259-260.
- [15] 黄家会, 宋雷, 陈先德, 等. 地下深部灰岩岩石特性的单孔雷

- 达反射研究[J].水文地质工程地质,1999(6):57-59.
- [16] 曾奇,余海忠,孙泽会.钻孔雷达层析成像法探测地下岩溶的数值模拟[J].城市勘测,2020(3):181-187.
- [17] Ohno H, Naruse H, Kihara M, et al. Industrial Applications of the BOTDR Optical Fiber Strain Sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2001, 7(1):45-64.
- [18] 蒋小珍,雷明堂,戴建玲,等.岩溶(土洞)塌陷TDR监测试验研究[J].水文地质工程地质,2011,38(1):118-122.
- [19] 胡让全,黄健民.土壤氨浓度测量在广州市岩溶地面塌陷、地面沉降地质灾害调查中的应用[J].地球物理学进展,2015,30(2):975-982.
- [20] 李凡.气体示踪剂监测技术的研究与应用[D].青岛:中国石油大学(华东),2013.
- [21] 蒙彦,郑小战,雷明堂,等.珠三角地区岩溶分布特征及发育规律[J].中国岩溶,2019,38(5):746-751.
- [22] 程鉴基.广州市地面塌陷特征与防治对策的初步研究[J].建筑结构,2011,41(S2):443-448.
- [23] 黄健民,吕镁娜,郭宇,等.广州金沙洲岩溶地面塌陷地质灾害成因分析[J].中国岩溶,2013,32(2):167-174.
- [24] 郭宇,黄健民,周志远,等.广东广州市白云区金沙洲地区地质灾害现状及防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(3):100-104.

Experimental study of gas tracer simulation of karst collapse development process: An example of Jinshazhou, Guangzhou

LI Zhuojun^{1,2}, MENG Yan¹, DONG Zhiming³, JIA Long¹, PAN Zongyuan¹, GUAN Zhende¹, ZHOU Fubiao¹

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Huajie Engineering Consultants, Inc. Beijing 100029, China)

Abstract Karst collapse is one of main geological hazards in karst areas in China, which can be generally divided into two types: sinkhole and karst collapse. Sinkhole is widely distributed and numerous, and how to monitor them and make an early warning is a focused issue. The primary characteristic of sinkhole development is that under the action of groundwater and other factors, the internal structure of soil is deformed and damaged and then produces cracks and caves. The common monitoring and early warning methods include physical exploration, groundwater dynamic condition monitoring and other nondestructive detection tools. A relatively new technical method in this aspect is to use gas tracer. Its principle is to analyze the relationship between gas characteristic values and soil deformation and damage based on observation to gas transport in soil pores, cracks and holes of different shapes and sizes, and then indirectly judge the development of sinkhole to achieve karst collapse monitoring and early warning. In this work, taking the karst collapse area of Jinshazhou, Guangzhou as an example, the whole process from sinkhole development to ground collapse was reproduced by indoor physical model tests, and then the relationship between gas concentration, gas accumulation time and other parameter indexes and different development stages of karst collapse was studied by using gas tracing technique in five processes of a sinkhole: formation, development, blockage, expansion and collapse. The results show that (1) there is a correspondence between the development of sinkhole and tracer gas concentration, and the increase of gas concentration reflects the further development of soil deformation and damage. (2) There is a positive correlation between the soil deformation and damage and tracer gas concentration in general, and the closer to the ground collapse, relatively higher the concentration. (3) There is a correspondence between the soil deformation and damage and the time of tracer gas concentration reaching peak concentration, and the closer to the ground collapse, the faster the gas concentration reaching the peak. These experimental results demonstrate that it is feasible to use gas tracer technology to conduct monitoring and early warning of karst collapse. Later on we will conduct further research on early warning thresholds and carry out practical verification in the field.

Key words karst collapse; model test; gas trace; monitoring and early warning; Jinshazhou of Guangzhou

(编辑 张玲)