

# 岩溶地面塌陷监测技术与方法<sup>①</sup>

李 瑜<sup>1</sup>, 朱 平<sup>2</sup>, 雷明堂<sup>1</sup>, 蒋小珍<sup>1</sup>, 戴建玲<sup>1</sup>, 蒙 彦<sup>1</sup>

( 1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004 2. 重庆师范大学地理科学学院, 重庆 400047 )

**摘 要** 重点阐述地质雷达和岩溶管道裂隙中的水(气)压力传感器自动监测两种监测技术的原理及在岩溶塌陷监测中的应用,对光导纤维监测技术的原理及其在岩溶塌陷监测、预报的应用前景进行了展望。同时分析、说明了三种塌陷监测方法的优缺点和适用条件。地质雷达监测费用昂贵,适用于短距离、小范围监测;光纤监测法适用于各种线状工程监测;岩溶管道裂隙中的水(气)压力传感器自动监测法则适用于由地下水触发的塌陷的监测。

**关键词** 岩溶塌陷,地质雷达,传感器,监测技术

**中图分类号** P631, P642.25 **文献标识码** A

## 0 前 言

近年来,随着岩溶区土地资源、水资源和矿产资源开发以及工程建设等人类活动作用的不断增强,由此引发的岩溶塌陷灾害频繁发生,造成的损失越来越大,已成为岩溶区城市的主要地质灾害,严重妨碍城市经济建设与发展。

由于岩溶塌陷的产生在时间上具突发性,在空间上具隐蔽性<sup>[1]</sup>,采取地面常规监测手段来监测预报岩溶塌陷的产生非常困难。因此,选择有效的监测方法,对于岩溶塌陷的预测预报具有重要的意义。

## 1 岩溶塌陷的监测技术

目前,岩溶塌陷的监测方法归纳起来可分为直接监测法和间接监测法两类。直接监测方法就是通过直接监测地下土体或地面的变形来判断地面塌陷的方法,如监测地面沉降、地面和房屋开裂等常规方法,以及地质雷达和光导纤维等监测地下土体变形的非常规方法。间接监测方法主要有岩溶管道系统中水(气)压力的动态变化传感器自动监测技术。由于塌陷具有突发性,经过我们多年的研究和实践发现,采用监测地面沉降、地面和房屋开裂的方法来监测塌陷,效果并不好,而采用地质雷达等直接监测和岩溶管道系统中水

(气)压力的动态变化传感器自动监测的间接监测技术来监测塌陷则取得了较好的效果。

### 1.1 直接监测方法

#### 1.1.1 岩溶塌陷的地质雷达监测技术

##### (1)地质雷达的工作原理

由发射天线向地下发射高频电磁波,通过接收天线接收从地下不同电性界面上反射回来的信号。当地下物体的介电常数差异较大时,就会形成反射界面,电磁波在介质中传播时,其路径、电磁场强度等随介质的电磁性质及几何形态而变化。所以,根据接收波的旅行时间、频率等资料,可推断介质的结构<sup>[2]</sup>。由于发生扰动、形成土洞的地下土体与其周围的原状土体具有明显不同的介电常数异常。因此,通过地质雷达定期、定线路的探测扫描对比,就可以推断地下土体的变化,从而达到监测土洞的形成、发展过程,进而预测岩溶塌陷。

##### (2)监测实例

柘木村位于桂林市东南约15km的漓江西岸,1997年11月11日因漓江河道爆破引发严重塌陷,造成民房倒塌4户、房屋开裂64户。多年来,该村塌陷一直发展不断,时刻威胁着全村群众的生命财产安全。为此,我们在柘木村开展现场监测试验,建立岩溶塌陷

① 资助项目:广西科学基金项目(桂科基0448086)“覆盖型岩溶区地下水资源安全开采技术方法研究”、国土资源部百人计划项目“岩溶塌陷临界条件试验研究”、国土资源部调查项目“岩溶塌陷自动化监测”

第一作者简介:李瑜(1965-),男,1988年长春地质学院工程地质专业毕业,副研究员,长期从事地质灾害防治研究工作。

收稿日期:2005-02-25

灾害监测站。

柘木村处在漓江一级阶地,覆盖层厚度 15~40m,为三元结构:上部为粘性土层,一般为粘土、粉质粘土和杂填土等;中部为砂卵石层,不含粘粒,以卵石为主,一般顶部有厚 1m 左右的砂层,局部有中粗砂夹层;下部为含粘土卵石层,其中粘土含量变化较大,但一般为 15% 以下,粘土多呈软塑~流塑状。下伏基岩为上泥盆统融县组灰岩( $D_3r$ ),岩溶发育。

该区发育两条断层(图 1),其一为 NW 向的龙家断层( $F_1$ ),该断层正好从柘木村穿过,是一条规模较大的断层,早期为压扭性,晚期表现为明显的扭性—张

性特点,它控制了漓江部分河道的走向,是一条富水断层。另外还发育一条规模较小近 NW 向的断层( $F_2$ )。

该区地下水有两类:第四系孔隙水和岩溶水。第四系含水层为砂卵石层,是当地农民生活用水的主要来源。岩溶水为上泥盆统融县组灰岩水,水量丰富,与第四系孔隙水具有较强的水力联系。研究区为地下水的排泄区,第四系孔隙水主要靠大气降水、地表水入渗、漓江和地下径流补给,岩溶水由第四系孔隙水越流补给、降雨入渗、地下径流以及漓江的补给,一般具有微弱的承压性。本区地下水受到人类活动的影响较小,水位波动基本上主要受自然条件的影响和控制。

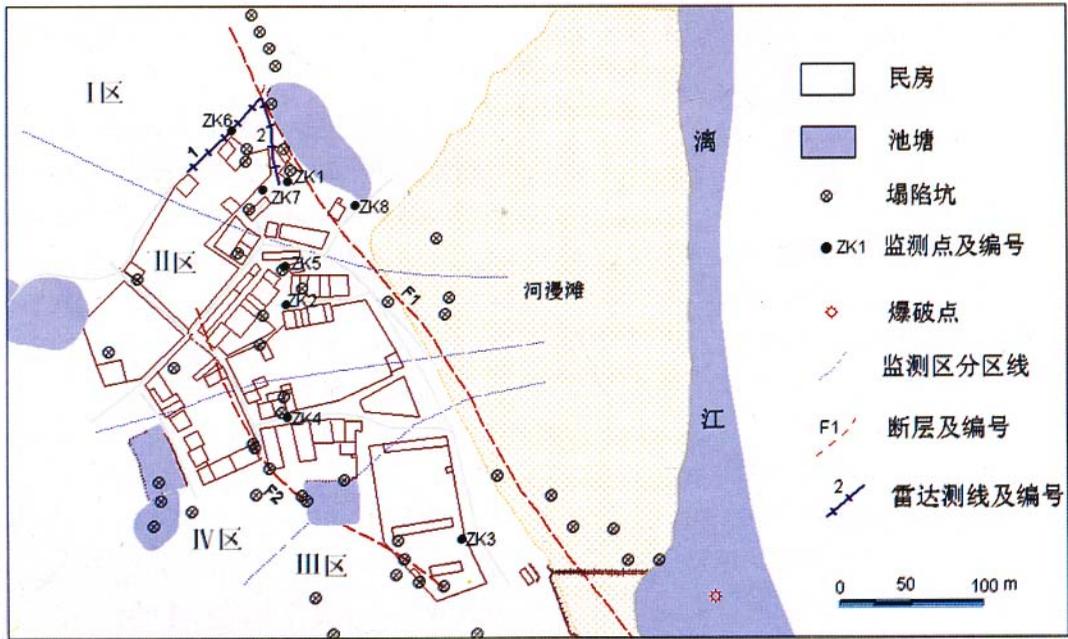


图 1 监测区划分及监测点、线布置图

Fig. 1 Partition of monitoring area and arrangement of monitoring points and lines

雷达探测线 1#、2#布置在 I 监测区(图 1),地质雷达采用 100MHz 雷达天线和连续扫描方式进行监测,分别在 2001 年和 2002 年的 11 月 8 日对测线进行扫描。

图 2 和图 3 分别为 1#和 2#雷达测线 2001、2002 年的地质雷达探测结果对比图像。

从图 2 可以看出,1#测线(走向 NE)在 2001 年有 4 个异常段(从测线的西南端起算):①段在 8~13m 之间,深度 3~8m;②段在 15~21m 之间,深度为 3~8m;③段在 22~27m 之间,深度为 3~8m;④段在 29~40m 之间,深度为 3~8m,其中 3~4m 为土洞。而 2002 年的探测结果有所差别:①段、②段异常分别在 7~14m 和 17~22m,深度均为 3~8m,与 2001 年探测结果相近,说明异常土体受地下水的影响减弱,异常土

体不再进一步发展。2001 年的③异常段,在 2002 年不见了,说明经过一年的调整,该段逐渐趋于稳定;④段则继续向上发展,埋深已达 0.5m,接近地面,有塌陷的危险。

图 3 的探测结果也类似。2001 年 2#测线(走向近 NS)有 3 个土体扰动异常段(从测线的北端起算),分别为①段在 6~16m 之间,深 3~10m;②段在 20~34m 之间,深 3~10m;③段在 36~51m 之间,深 3~10m,而 2002 年的探测结果有较大的变化。2001 年有土体扰动异常的①、②段位置,在 2002 年相应地段的土体扰动异常范围明显变小,分别位于 12~15m、32~33m、35~37m,深度均为 3~10m,说明这些地段经过一年的调整,扰动土层受地下水影响减弱,以压密作用为主,地层逐渐趋于稳定,而③段在 2002 年的探测中土层扰

动区继续向浅部发展,已接近地表,为 0.5m,说明该地段地下水的影响仍很强烈,土体以变形破坏为主,应警惕该处可能发生塌陷。

以上地质雷达探测结果表明,经过 1997 年的大规模塌陷后,部分地改变了柘木村的地质和水文条件,一部分原来受扰动的地下土体可能由于地下水的影响减弱,在上部土体的压密作用下,扰动区逐渐缩小甚至消失;一部分仍受地下水强烈影响的扰动土体则继续活动,并向上发展,形成土洞,有发生塌陷的危险。

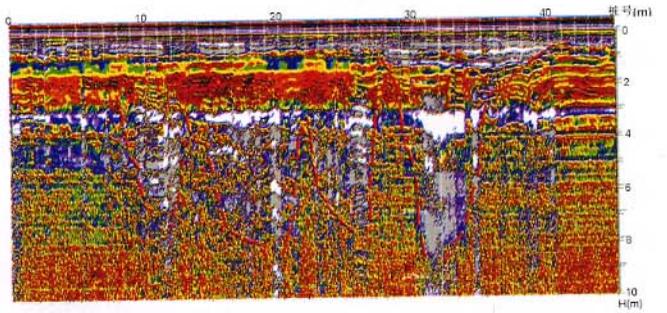
### 1.1.2 光导纤维监测技术

#### (1) 监测原理

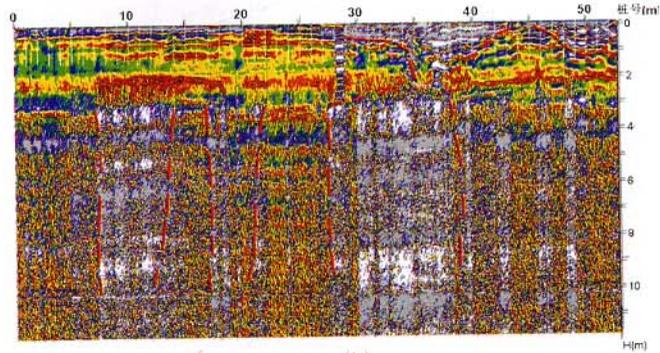
光导纤维监测技术也称布里渊散射光时域反射监测技术,是一种不同于传统监测方法的全新应变监测技术。其原理是,当单频光在光纤内传输时会发生布里渊背向散射光,而布里渊背向散射光与应变和温度成正比,在温差小于 5℃ 时,可以将温度影响忽略不计,此时,光纤中的应变变量可按下式计算:

$$\varepsilon = \Delta V_B / [V_B(o) \cdot C]$$

式中  $\Delta V_B$  为某应变下的布里渊频移,  $\Delta_B(o)$  为无应变下的布里渊频移,  $C$  为应变比例常数,  $\varepsilon$  为应变变量<sup>[3]</sup>。



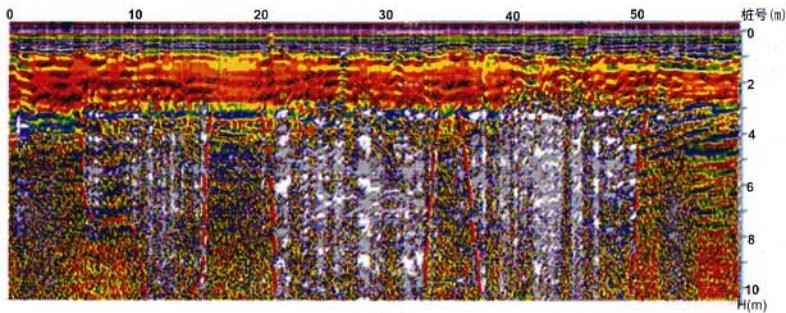
(a)



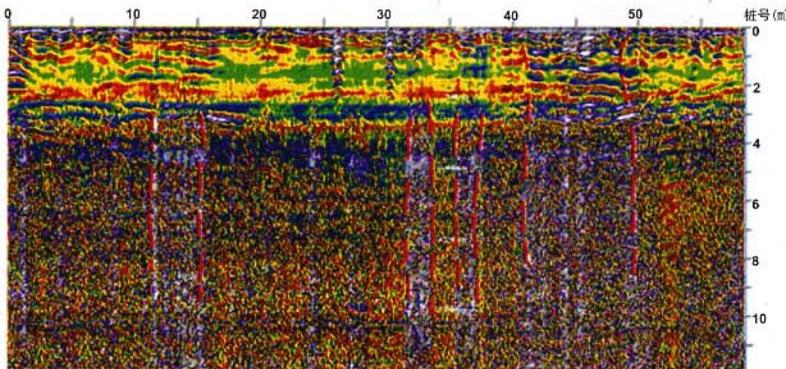
(b)

图 2 桂林柘木村 1#线 2001 年 (a) 和 2002 年 (b) 地质雷达探测结果对比

Fig. 2 Comparison of the detected results by geological radar along 1# in 2001( a ) and 2002( b ) in Zhemu village , Guilin



(a)



(b)

图 3 桂林柘木村 2#线 2001 年 (a) 和 2002 年 (b) 地质雷达探测结果对比

Fig. 3 Comparison of the detected results by geological radar along 2# in 2001( a ) and 2002( b ) in Zhemu village , Guilin  
万方数据

## (2) 光导纤维监测技术在塌陷监测、预报中的应用前景

光导纤维监测技术目前的最大测量距离为 80km, 应变测量范围为  $-1.5 \sim +1.5\%$ , 应变测量精度达  $\pm 0.003\%$ , 既能对早期的土层小变形作出反应, 又能对中后期土层的大变形(如垮塌)作出反应。因此, 可利用光导纤维技术对土体内部的变形量进行监测来预报塌陷, 尤其适用于线状工程如岩溶区高速公路塌陷监测中。

实际使用过程中, 在高速公路建设施工时, 根据要求沿公路将光纤按一定的深度间隔铺设于路基以上路面以下, 当公路投入使用后, 即可不断获得路基不同位置的土层垂直变形情况, 从而判断公路可能发生塌陷的时间和位置。尽管光纤监测技术在塌陷监测应用上, 我们目前尚在试验中, 但从光纤监测技术在滑坡变形监测应用上所取得的成果看, 光纤监测技术在塌陷监测预报工作中的运用前景应该是光明的。

### 1.2 岩溶塌陷间接监测方法

岩溶塌陷的间接监测方法, 经过我们的实践, 较为有效的是岩溶管道系统中水(气)压力的动态变化传感器监测技术。

#### (1) 监测原理

室内岩溶塌陷模拟试验表明, 频繁的地下水(气)压力的变化, 会造成第四系土层的变形破坏。当水(气)压力变化或作用于第四系底部土层的水力坡度达到该地层土体的临界值, 第四系土层就会发生破坏, 进而产生地面塌陷。因此, 通过监测地下水(气)压力

的变化可以对岩溶塌陷进行监测预报。

#### (2) 监测实例

以桂林柘木村 II 监测区 2002 年监测结果为例(见图 1)。该区内, 共布置传感器监测点 2 个(ZK2、ZK5), 安装传感器 4 支(监测岩溶管道裂隙水气压力和土层孔隙水压力各 2 支); 其中 ZK2 中监测第四系和岩溶水压力的两个传感器(130#、189#)和 ZK5 的监测第四系水压的一个传感器(108#)采用人工监测, 一般监测间距为每两天一次, 雨季为一天一次; 而 ZK5 中监测岩溶水压的传感器(677#)采用自动数据采集仪监测, 监测间距为 1 小时一次, 根据需要可加密到 10 秒钟监测一次。

图 4 是 ZK2 点 2002 年岩溶水(189#)和土层孔隙水压力(130#)变化曲线。水压力最大变幅约为 40kPa。

图 5 是 ZK2 的岩溶水压力变化速度, 最大速度为 0.00033kPa/s。

图 6 是 ZK5 点岩溶水(677#)和土层孔隙水压力(108#)变化曲线, 压力最大变幅约为 36kPa。

图 7 是 ZK5 点岩溶水压力变化速度曲线, 最大速度值为 0.085kPa/s。

2002 年监测 II 区地面发生异常仅两次, 其与地下水(气)压力异常变化对应情况见表 1。

从图 4~7 和表 1 可以看出, 在地面出现异常以前, 异常点附近监测点岩溶水压力均发生过突变, 地面异常与岩溶水的突变具有明显的对应关系。

表 1 桂林柘木村 2002 年 II 监测区地面异常与地下水气压力异常变化情况一览表

Tab. 1 Schedule of the surface water and groundwater anomalies in monitoring area II since 2002 in Zhemu village, Guilin

| 编号 | 时间              | 位置                          | 异常类型 | 地面异常情况描述  | 水压异常情况  |
|----|-----------------|-----------------------------|------|---|---|
| 1  | 2002 年 5 月 16 日 | ZK2、ZK5 监测点附近的唐朝息家天井旁(II 区) | 塌陷   | 唐朝息家其天井旁水泥地面走路时有异常, 经敲击发现, 异常区为直径 70cm 的近圆形, 推断可能为塌陷造成地板架空。当地 13-14 日大雨 | ZK2 测点 5 月 16 日岩溶水、土层水压力出现峰值, 岩溶水压力为 193kPa, 变幅为 50kPa, 渗透坡降为 0.5<br>ZK5 测点在 5 月 16 日岩溶水压力出现峰值 143kPa |
| 2  | 2002 年 6 月 17 日 | 1#房后(II 区)                  | 塌陷   | 当天早上发现塌坑: 近圆形, 直径 4.2m, 深 2.0m。当地 15-17 日均下大-暴雨                         | 6 月 17 日岩溶水、土层水压力出现峰值, 岩溶水压力为 186kPa, 变幅为 42kPa, 渗透坡降为 0.5  |

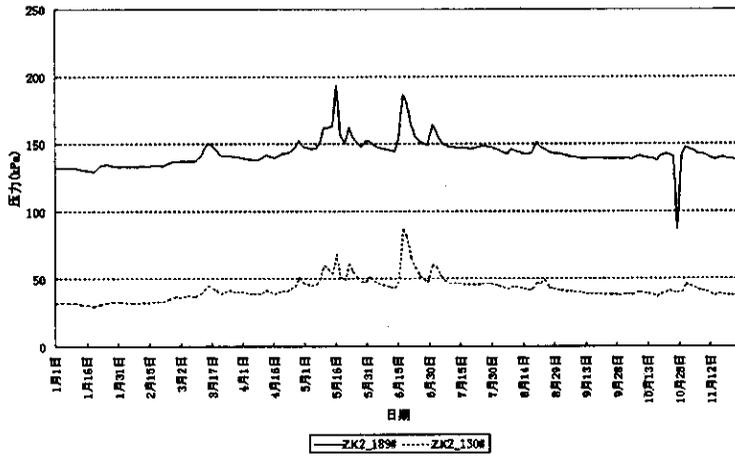


图 4 桂林柘木村 2002 年 ZK2 岩溶水( 189#)和土层孔隙水压力( 130#)变化曲线

Fig.4 Variation curve of karst water pressure( 189#)and pore water pressure( 130#)at ZK2 in 2002 in Zhemu village , Guilin

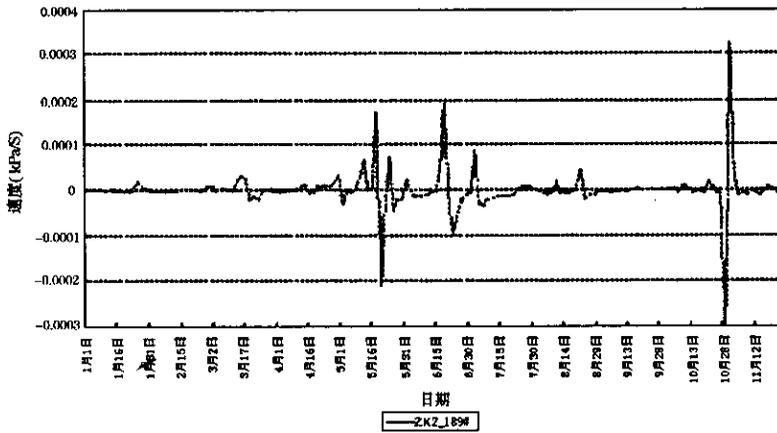


图 5 桂林柘木村 2002 年 ZK2 岩溶水压力变化速度

Fig.5 Variation rate of karst water pressure at ZK2 in 2002 in Zhemu village , Guilin

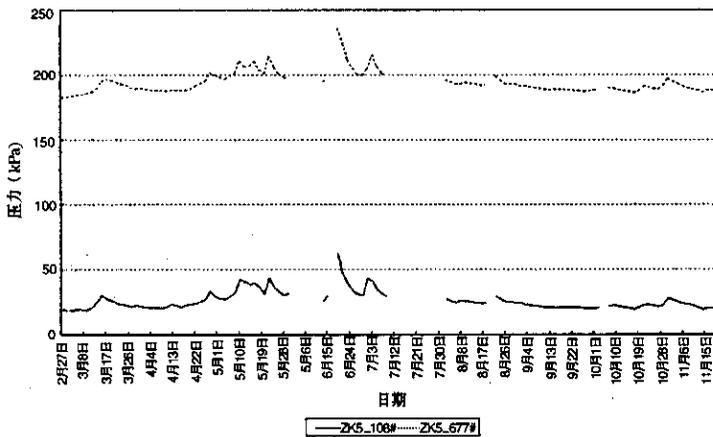


图 6 桂林柘木村 2002 年 ZK5 点岩溶水( 677#)和土层孔隙水压力( 108#)变化曲线

Fig.6 Variation curve of karst water pressure( 677#)and pore water pressure( 108#)at ZK5 in 2002 in Zhemu village , Guilin

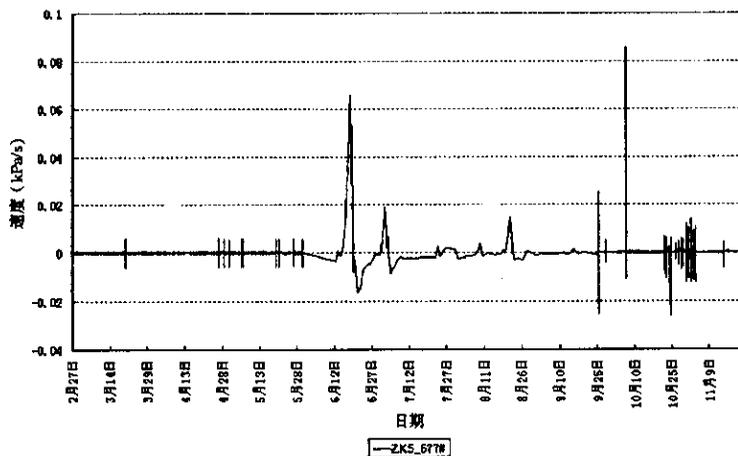


图7 桂林柘木村 2002 年 ZK5 岩溶水压力变化速度曲线

Fig.7 Variation rate curve of karst water pressure at ZK5 in 2002 in Zhemu village , Guilin

## 2 结 论

尽管岩溶塌陷的形成机理非常复杂,其发生具有突发性和隐蔽性,但根据不同的情况,选择合理的监测方法,岩溶塌陷仍是可监测和预报的。

(1)对于高速公路等线状工程可采用地质雷达和光导纤维等直接监测方法对岩溶塌陷进行监测和预报。不过,由于使用费用昂贵,地质雷达适于短距离、小范围的区域使用,而成本低廉,同时又能连续进行监测的光导纤维技术更适用于距离较长的线状工程的岩溶塌陷监测预报。

(2)就柘木研究区的地质条件而言,由地下水引

发的岩溶地面塌陷采用岩溶管道裂隙系统中的水(气)压力传感器自动监测技术,再辅以地质雷达和光导纤维等技术,来监测岩溶塌陷是可行的,但在其他情况下是否适用,还需进一步的实践和研究。

### 参考文献

- [1] 雷明堂,等.岩溶塌陷预测评价系统及其应用[J].中国岩溶,1997,16(2).
- [2] 雷明堂,等.桂林柘木岩溶塌陷监测预报.中国岩溶地下水与石漠化研究[M].广西科技出版社,2004年.
- [3] 施斌,等.分布式应变测量技术在滑坡早期预警中的应用[J].工程地质学报,2004,12(增刊).

## MONITORING TECHNIQUE AND METHODS OF THE KARST COLLAPSES

LI Yu<sup>1</sup>, ZHU Ping<sup>2</sup>, LEI Ming-tang<sup>1</sup>, JIANG Xiao-zhen<sup>1</sup>, DAI Jian-ling<sup>1</sup>, MENG Yan<sup>1</sup>

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract:** The paper discusses the principle and application of two kinds of monitoring techniques used in karst collapse monitoring: ground penetrating radar (GPR) and karst groundwater (gas) pressure in conduit. And then, the principle and expectation of the BOTDR used in monitoring and forecasting of karst collapse are also introduced. Finally, advantages and disadvantages of three monitoring techniques were analyzed: the GPR is expensive, thus suitable for short distance, small area and none real-time monitor; the BOTDR is suitable for monitoring linear infrastructure; karst groundwater (gas) pressure monitor techniques is suitable for monitoring the collapse induced by groundwater fluctuation.

**Key words:** Karst collapse; GPR; BOTDR; Monitoring technique