

岩溶塌陷实时监测

雷明堂 蒋小珍 李瑜 蒙彦
(中国地质科学院岩溶地质研究所 541000 桂林)

[摘 要] 我国可溶岩分布面积达 365 万平方千米, 占国土面积的 1/3 以上, 是世界上岩溶最发育的国家之一。近年来, 随着岩溶区城市化建设的飞速发展, 岩溶区土地资源、水资源和矿产资源开发的不断增强, 由此而引发的岩溶塌陷问题日益突出, 已成为岩溶区城市主要地质灾害问题, 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, 在机制上具复杂性, 因此, 被普遍认为难以采取地面常规监测手段, 对塌陷进行监测预报。另一方面, 试验研究表明, 岩溶水气压力变化对塌陷具有触发作用, 可以以此作为衡量塌陷发育的临界条件。这就意味着通过对岩溶管道系统的水(气)压力的动态变化进行观测, 可以达到对塌陷进行预报的目的。本文以位于广西桂林柘木村的岩溶塌陷监测站为例, 探讨这一技术的基本方法。

[关键词] 岩溶塌陷 岩溶管道 水(气)压力 临界水力坡度 监测

1 研究区概况

研究区位于桂林市东南约 15km 漓江西岸柘木村(图 1), 面积约 0.2km², 现有居民 116 户。该区



图 1 研究区地理位置

于 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。由于近年来塌陷仍在发展之中，时刻威胁着人民群众的生命财产安全，所以，我们以此作为本项目的现场试验场地，建立岩溶塌陷灾害监测站，开展研究工作。

1.1 岩溶塌陷发育特征

柘木塌陷发生于 1997 年 11 月 11 日,首先是河漫滩发生 2 起塌陷,然后是柘木村十多处地面冒水喷砂(水柱高出地面 3m 多),接着就发生大面积的塌陷和地面开裂,形成塌坑 35 个,到 98 年底形成塌坑共计 50 多个。(图 2)

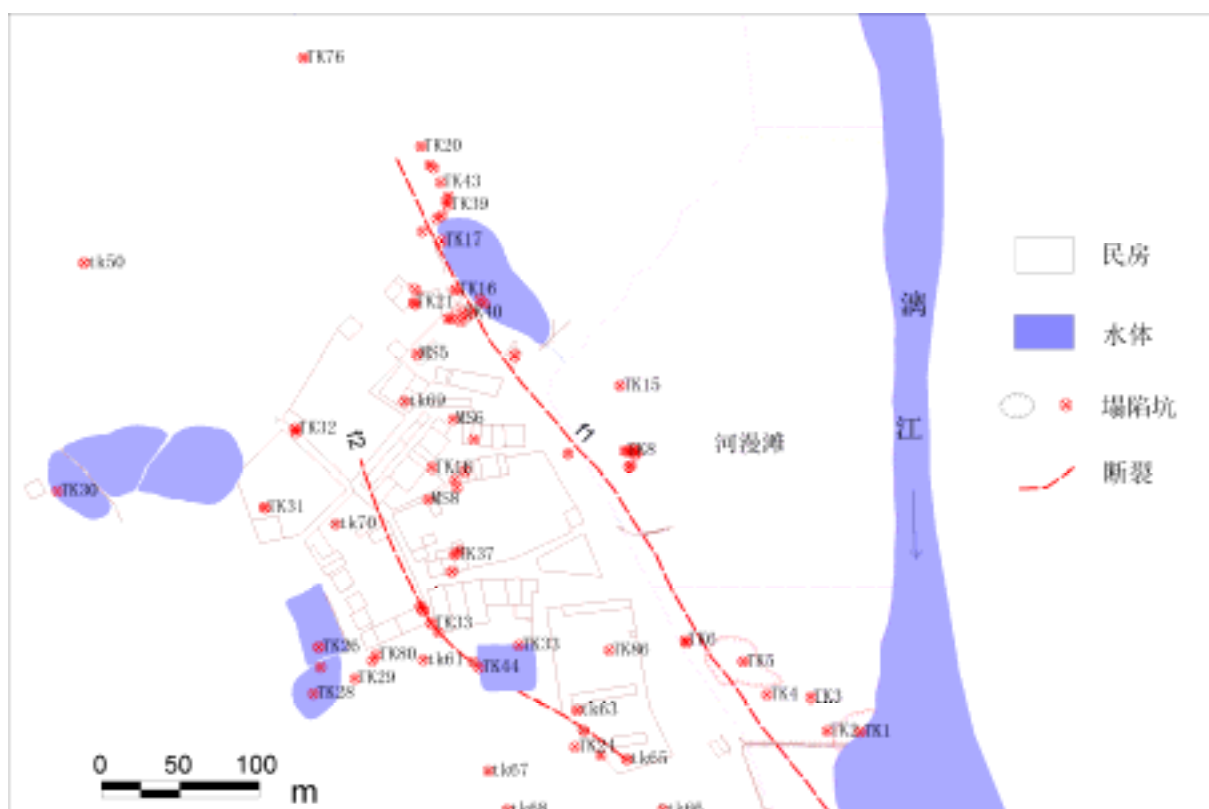


图 2 工作区塌陷分布图

柘木村的塌陷平面形态绝大多数为圆形和椭圆形，仅有个别为不规则形，剖面形态以坛状为主，除了位于河漫滩的基岩塌陷直径（或长轴）达到 30m、深 14m 以上外，村中的土层塌陷直径（或长轴）从 0.5m 到 10m 不等、深几十公分到 5m。塌陷在平面分布上具有明显的成带性和方向性，所有塌陷都是呈 NW 向发育的，其中大多数塌陷又是沿 f1 和 f2 断层成带状分布。塌陷在时间上的具有

延续性，根据 1986、1996 年项目组对桂林市塌陷的详查，该区均无塌陷记录，自 1997 年第一次发生塌陷以来，每年都有塌陷的发生。

1.2 地质条件

研究区地貌上处于漓江一级阶地和河漫滩的结合部位，覆盖层厚度 15~40m。其中，柘木村所在的一级阶地覆盖层可归结为三元结构：上部为粘性土层，一般为粘土、粉质粘土和杂填土（含卵石和砖块等硬质物）等；中部为砂卵石层，本层不含粘粒，以卵石为主，一般顶部有厚 1m 左右的砂层，局部有中粗砂的夹层；下部为混合土，以粘土卵石和卵石粘土层为主，两者分界不明显，经常互相交替，粘粒含量变化较大，zk1 钻孔附近还夹有粘土层透镜体、zk4 孔底部还见有厚约 10m 的软土层。下伏基岩为泥盆系上统融县组灰岩（D_{3r}），是桂林市岩溶最发育、塌陷最多的地层。

1.3 构造条件

研究区位于二塘向斜核部及 NW 向龙家断层和 NE 向毛家断层的交汇部位，其中 NW 向的龙家断层正好从柘木穿过，龙家断层（f1）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，该断层是一条富水断层。

浅层地震物测显示，柘木除发育龙家断层（f1）外，另外还发育一条走向也是近 NW 向的断层（f2）。（图 2）

1.4 水文地质条件

根据地下水的赋存条件，研究区地下水有两类：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。岩溶水为桂林最丰富的泥盆系上统融县组灰岩水，与第四系孔隙水之间有一层混合土相隔，该层土主要由粘土卵石和卵石粘土组成，其隔水性一般至中等，岩溶水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；岩溶水主要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，岩溶水一般具有微弱的承压性。由于紧靠漓江，地表水丰富，除了使用手摇井或民井提取第四系砂卵石含水层的少量水作为饮用水外，研究区未进行过大量地抽取过地下水（包括岩溶水和第四系水）的活动，就是说，本区地下水受到人类活动的影响较小，其水位波动基本上主要受自然条件的影响和控制。

1.5 人类活动条件

工作区人类活动类型单一，村中各户均有手动压水井，以满足日常生活用水，井深小于 10m，开采第四系砂卵石层中的孔隙水。

自 1997 年塌陷以后，工作区已完全停止爆破活动，因此，后来的新塌陷，均属于受扰动的土体在自然条件影响下产生。

2 监测预报思路

2.1 岩溶塌陷发育机理与影响因素分析

根据现场调查分析，当时漓江中正在进行航道基岩爆破导致地下河出口附近的基岩塌陷及由此产生的塌陷地震是引发后续大范围塌陷的根本原因。

由于高压水流的作用使工作区第四系底部土层受到了严重的扰动，大大降低了使之发生渗透变形的临界水力坡度，降低土层的抗塌能力，地下水只要有较大的变动，就会引发新的塌陷，这是近年来塌陷不断的根本原因，这与岩溶塌陷物理模型试验的结果是一致的。(图 3)

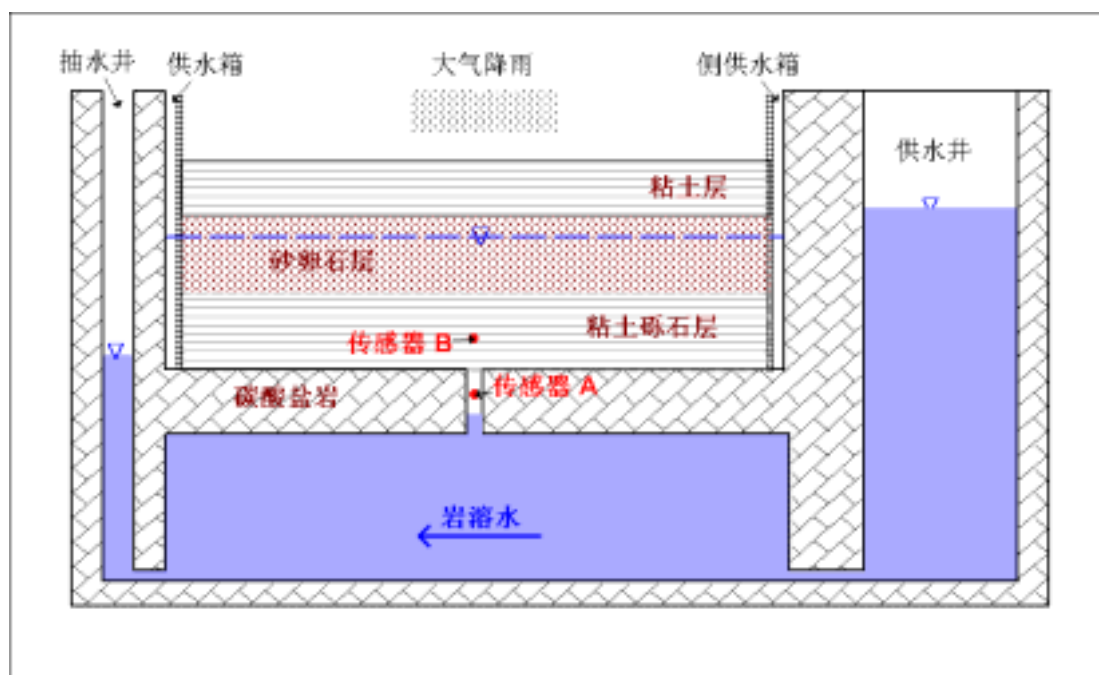


图 3 模型试验图示

注：当 A 点的压力变化速率或者作用于 A、B 之间土体的水力坡度达到一定条件值时，土体往往会发生破坏。

新塌陷的产生主要受几个方面的影响：

一是岩溶管道(裂隙)系统和第四系底部土层中的水气压力的变化：当岩溶管道(裂隙)系统的水气压力变化或作用于第四系底部土层的水力坡度达到某一定值时，第四系土层就会发生破坏，进而产生地面塌陷。目前，通过孔隙水压力传感器和数据自动采集系统已完全可以记录到岩溶管道(裂隙)系统的水气压力动态变化，并计算出作用于第四系底部土层的水力坡度。

二是第四系底部土层的组成与性质：组成和性质不同，发生渗透变形的临界水力坡度就会不同。目前，通过现场钻孔取样和室内渗透变形试验的方法，可以测定出不同土层发生渗透变形的临界水力坡度值。

所以，我们可以通过对地下水(包括岩溶水 - 传感器 A、土层孔隙水 - 传感器 B)的压力变化进行监测，达到对地面塌陷进行预报的目的。

2.2 预测预报思路

基于以上认识，采取如图 4 所示的研究思路开展工作，即：

- 1. 首先，以已有岩溶塌陷及其影响因素的调查结果分析为基础，通过渗透变形试验和土工试验等分析测试，初步确定塌陷发育的临界条件。
- 2. 通过传感器及数据采集系统，直接监测主要诱发(触发)因素（包括岩溶水 - 传感器 A、土层孔隙水 - 传感器 B）的动态变化。
- 3. 结合地质雷达探测显示的异常区，建立临界条件的修正模型，使室内模型试验与渗透变形试验成果实用化。
- 4. 当主要诱发(触发)因素的数值满足临界条件时，直接发出预报。

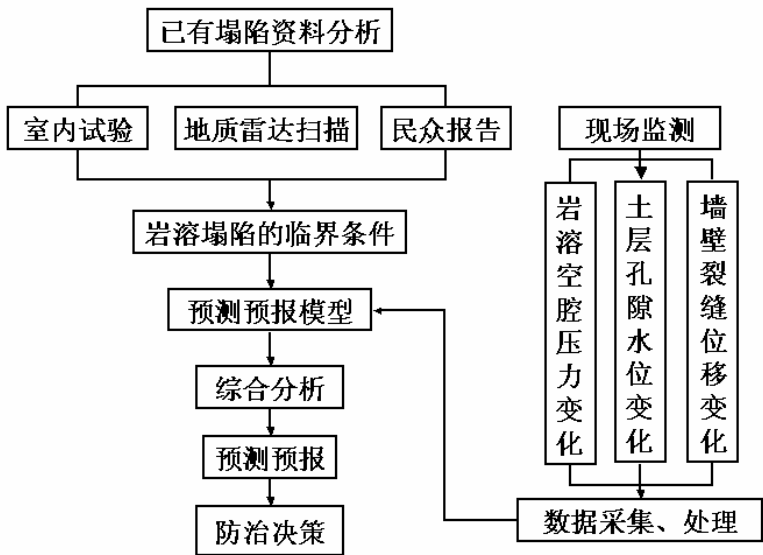


图 4 研究工作思路

3 塌陷发育的临界条件试验研究

以 49 组土样渗透变形试验结果为基础，初步确定工作区 3 种类型土体发生塌陷的临界条件(临界水力坡降 I_0 表示)如表 1 所示，表中临界速率是根据项目组以往对桂林岩溶塌陷模型试验研究结果取得。

预报中，主要采用第四系底部土层的临界条件作为判据，勘探结果表明，在整个工作区，第四系底部存在连续性较好的粘土卵石层，而且受过较强列的扰动，因此，临界条件为： $I_0=0.79$ ， $V_0=0.06\text{kPa/S}$ 。

预报时，通过两种方法进行判断：

岩溶水压力波动速率 V 与 V_0 的比较：当 $V > V_0$ 时，基岩面附近的土层将可能发生渗透破坏，有产生塌陷的可能。

由岩溶水压力、土层水压力以及两个传感器距离计算出来的水力坡度(I)与临界坡降(I_0)的比较：当 $I > I_0$ 时，基岩面附近的土层将可能发生渗透破坏，有产生塌陷的可能。

表 1 柘木塌陷的临界条件

土层名称	临界坡降		临界压力 (KPa)		临界速率 (kPa/S)
	裂隙发育	完整	裂隙发育	完整	
粘土	1.49	200	4	80	0.09
砂卵石	0.2	1.5	0.2	1.0	0.01
卵石粘土和粘土卵石	0.79	100	1.5	50	0.06

四、监测技术与方法

4.1 监测内容与监测方法

地下水(气)压力：包括岩溶管道裂隙系统水(气)压力监测和第四系底部土层水压力，采用孔隙水压力传感器进行监测，数据采集方式有计算机自动采集和便携仪人工读数两种。

土层变形破坏：在工作区设置固定测线，定期采用地质雷达监测。

民房裂缝变化：对监测区民房裂缝设置监测点，定期测量裂缝变化，采用钢尺监测。

民井水位：对工作区的两个露天水井定期测量水深，采用测绳人工监测

4.2 监测设备

4.2.1 传感器

振弦式仪器自 30 年代发明以来，由于其独特的优异特性如结构简单、精度高、抗干扰能力强以及对电缆要求低等而一直受到工程界的注目。然而，由于历史的原因，振弦式仪器的长期稳定性一直是争议的话题。直到 70 年代，随着现代电子读数仪技术、材料及生产工艺的发展，振弦式仪器技术才得以完善并真正能满足工程应用的要求。目前，性能完善的弦式仪器已成为新一代工程仪器的潮流。为此，监测站全部采用振弦式孔隙水压力传感器，由加拿大洛克泰斯特公司和美国基康公司生产。

4.2.2 数据采集系统

为了实现数据的自动采集和远距离传输，采用了美国基康公司生产的 MICRO_10X 数据自动采集系统以及由美国 Canary Systems 公司开发的数据采集软件 Multilogor1.48，此外，还采用了美国基康公司生产的 VW-403C 便携式振弦式读数仪。

4.2.3 地质雷达

最早是在越南战争中为了探测地道而研制的地质雷达，20 世纪 80 年代初期在美国开始用于潜

在塌陷勘察，90 年代在我国得到推广。它是一种用于确定地下介质分布的广谱（1MHZ—1GHZ）电磁技术，基本原理是：通过发射天线向地下发射雷达信号(频率为 80 ~ 1000mHz 的高频电磁波)，再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。只要地下物体的介电常数有明显差异，就会形成反射界面，电磁波在介质中传播时，其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电磁性质及几何形态而变化。所以，根据接收到波的旅行时间（亦称双程走时）幅度与波形资料，可推断介质的结构。因此，地质雷达可以探测到地下土洞等土层扰动带。地质雷达具有方便、快捷、准确地生成地下连续剖面的优点。

监测站采用美国的 SIR - 10A 型地质雷达。

4.3 传感器标定

为了建立水压力与传感器读数的关系，在室内，利用高 3m 的水箱以及深 20m 的地下水位观测井并进行传感器标定工作，建立各传感器的标定方程。

4.4 传感器安装方法

每个测点安装两支传感器，其中一支安装在岩溶管道裂隙中，用于监测岩溶水压力，另一支安装在第四系含水层中(图 5)，用于监测土层水压力的变化。

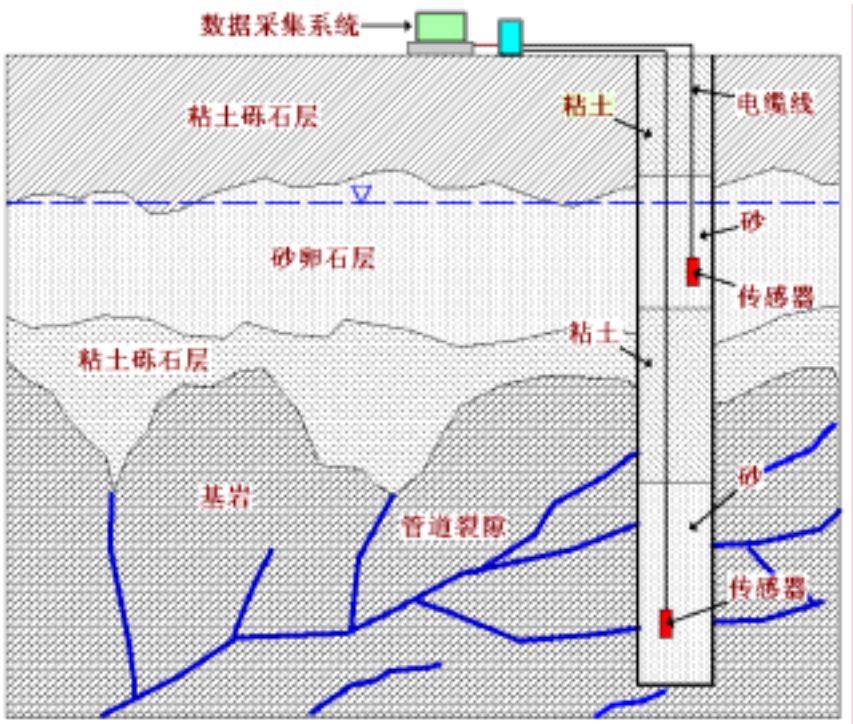


图 5 传感器安装位置图示

4.5 监测点布置

根据工作区岩溶塌陷发育特点、基础地质条件，以及柘木村中建筑物的重要性和破坏程度，将工作区分为 4 个监测区，共设置 16 个监测点，其中，岩溶系统的水(气)压力和第四系底部土层孔隙水压力监测点各 8 个、民井水位监测点 2 个、民房裂缝变化监测点 4 个、第四系土层变形破坏的地质雷达监测线 12 条，图 6 给出各监测点(线)的位置。

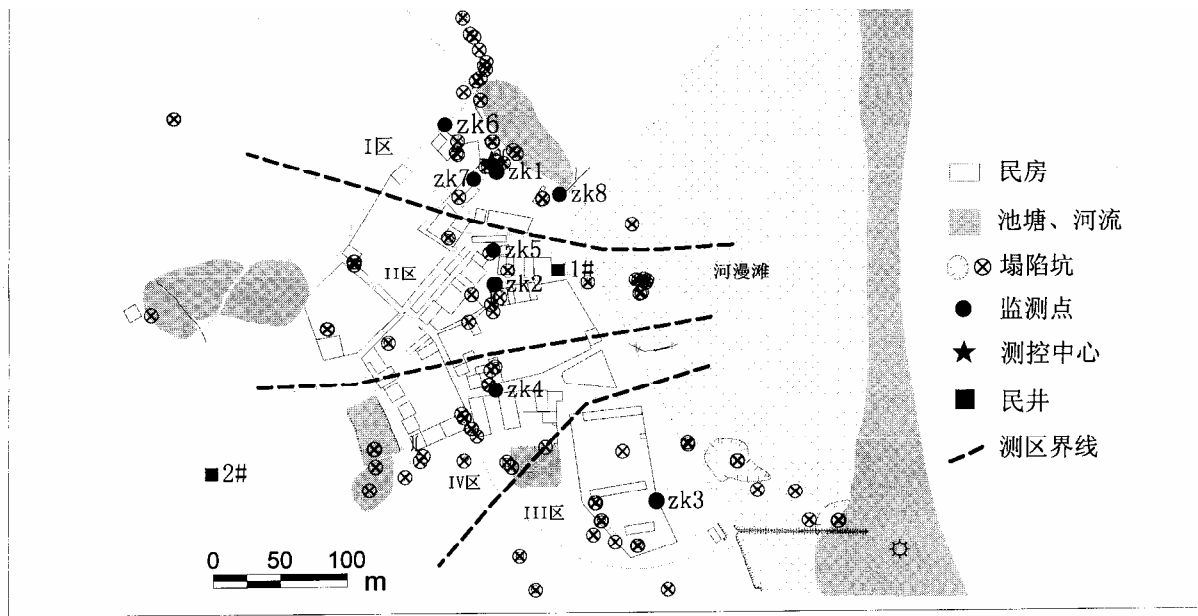


图 6 监测区划分与监测点布置图

4.6 数据采集

共有 8 支传感器采用 Micro_10X 数据自动采集系统进行数据采集，从 2002 年 2 月 27 日开始试运行，通过采集软件(dataloggor1.48)对各传感器连接的通道进行设置，本项工作将读数间隔为 10 分钟。

采用便携式接收仪，对其余的 8 支传感器进行数据采集工作，其中安装在 1[#]、2[#]、和 3[#]监测点的 6 支传感器从 2000 年 3 月 3 日开始监测，另 2 支埋设在 4[#]、5[#]监测点土层中的传感器从 2002 年 2 月 27 日开始测量，传感器监测周期雨季为每天 1 次，平时为 3 天 1 次。

4.7 土层扰动监测

通过地质雷达进行土层扰动情况的监测，在现场布置了 12 条测线，用地质雷达以相同的频率进行测量，每年测量一次。

5 监测结果分析

自 2000 年开始实施以来，地面发生异常 13 次，其中 2000 年 9 次、2001 年 2 次、2002 年也是 2 次，表 2 为异常一览表。

表 2 工作区 2000 年以来地面发生异常情况一览表

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	2000. 2. 12.	zk1、zk7 监测点附近唐冬息家客厅前部(I 区)	塌陷	唐冬息报告在 2 月中旬左右,客厅靠近大门左侧的地面走动时有异常,敲击发现异常区大致为 1.0*0.85m 的椭圆形,推测可能为塌陷造成地板架空所致。	监测工作未开始
2	2000.3.20.	zk1、zk7 监测点附近唐冬息家北西 60m 菜地(I 区)	塌陷	塌陷前连续多日下雨,20 日早上农妇摘菜发现一个塌坑:圆形,直径 0.6m,深 0.9m,出露地层为上部 40cm 灰黑色耕植土,下部可塑粉质粘土,未见水。	3 月 3~12 日,岩溶水压力有较大波动,幅度为 140kPa,平均速度为 0.00055kPa/S,渗透坡降最大为 1.6。
3	2000.04.05.	zk1、zk7 监测点附近的唐冬息家厨房北墙(I 区)	房屋开裂	厨房北墙裂缝:垂直发展,长 1.6m,宽约 1-2mm。4 月上旬柘木连续下小-中雨	3 月 27 日~6 月 19 日,163 传感器不稳定。
4	2000.05.13.	zk1、zk7 监测点附近的唐冬息家后水塘(I 区)	塌陷	塌坑直径约 0.5m,深约 0.15m,位于水下约 0.2m,出露地层为淤泥质土。塌陷前一周连续下雨,漓江水位上涨,原来干涸的水塘开始积水。	3 月 27 日~6 月 19 日,163 传感器不稳定。
5	2000. 05. 30. ~ 06. 18.	zk1、zk7 监测点附近的唐冬息家后水塘(I 区)	冒水	从 5 月 30 日开始冒水直至 6 月 18 日下午才停止。一般在连续多天降雨较大,漓江和水塘水位较高时才冒水,但往往在漓江水位下降一段时间后才会停止冒水。	3 月 27 日~6 月 19 日,163 传感器不稳定。
6	2000. 06. 25. ~ 06. 28.	zk1、zk7 监测点附近的唐冬息家后水塘(I 区)	冒水	在原冒水点又重新冒水	6 月 25 日水压力上升,幅度达 56kPa,渗透坡降为 1.3,压力平均变化速度为 0.00023。
7	2000.08.14.	zk3 监测点柘木小学教工宿舍前 4m(III 区)	塌陷	14 日晚至 15 日凌晨一直下暴雨,15 日早上教师发现塌坑:近椭圆形,长轴 0.65m,短轴 0.45m,深 0.65m,出露地层为黄褐色可塑粉质粘土。	从 6 月 22 日开始到 8 月 3 日,土层水压力持续下降,幅度为 2m 左右。岩溶水压力作小幅波动。7 月 13 日开始,岩溶水压力高于土层水压力,渗透坡降从 0.017 变为 -0.15。
8	2000. 08. 20.	zk1、zk7 监测点附近的唐冬息家厅门前地面(I 区)	地面开裂、下沉	8 月 20 日前后村民唐冬息家厅门上二楼刚新增加的圈梁轻微弯曲变形,为中间稍向下弯,但墙壁上尚未发现裂缝。推测为地面局部下沉。	8 月 3 日~18 日,岩溶水压力升高后又下降,变化速度为 0.0006kPa/S 峰值达 200kPa,渗透坡降为 1.2。

9	2001.02.05.	zk1、zk7 监测点附近的唐冬息家正门前墙壁(I 区)	房屋开裂	5 日唐冬息早上发现其重新处理粉刷的前墙上又出现 4 条裂缝宽都为 1-2mm :一条为沿北西边窗户左下角向下发展,倾角 450 ,长 0.45m ;第二条为在该窗的右边近垂直发展到楼板,长约 0.8m ;第三条为在南东边窗户的左边垂直向上发展,长 0.7m ;第四条为在南东边窗右下角向下发展,倾角约 450 ,长约 0.4m。	1 月份岩溶水压力波动幅度为 14kPa ,速度为 0.000012kPa/S。
10	2001.06.05.	zk1、zk7 监测点附近的唐冬息家正门前地面及猪圈下面(I 区)	地面开裂、墙体开裂	126#唐冬息家门前地面出现一裂缝:长 2.5m ,最宽 8mm ,走向 315°;同一天其猪圈下粪池冒水,粪池周围地面局部下沉;粪坑南出口的墙体沿墙厚方向的中间垂直发生开裂:长 1.2m ,最宽 4mm。	5 月 21 日岩溶水压力出现年度峰值 133.5kPa ,变化速度为 0.000216kPa/S ,渗透坡降为 1.8。
11	2002.05.016.	zk2、zk5 监测点附近的唐朝息家天井旁(II 区)	塌陷	16 日唐朝息说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。另外,14 日该房楼顶漏水(以前不漏水),但未发现明显开裂。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 Zk5 测点在 5 月 16 日岩溶水压力出现峰值 143kPa ,变化速度为 0.0057kPa/S
12	2002.06.017.	I#房后(III 区)	塌陷	据房主讲,16 日早上发现塌坑:近圆形,直径 4.2m ,深 2.0m ,出露地层为上部 30cm 杂填土,下部为可塑粉质粘土。当地 15-17 日均下大-暴雨。该塌陷为原 TK31 塌陷的复活。	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 ,变化速度为 0.00019kPa/S ,渗透坡降为 0.5
13	2002.06.30.	zk3 监测点柘木小学(III 区)	房屋基底漏水	据校长说,从 30 日开始学校主教学楼中间偏西的基底下大量漏水。漏水处仅见到一长 60cm ,宽 2-3 的开口,内部情况不祥。	6 月 17 日岩溶水、土层水压力出现峰值,岩溶水压力为 144.9kPa ,变幅为 4kPa ,变化速度为 0.0002kPa/S ,渗透坡降为 0.4

从表中可以看出,近 3 年来的异常主要发生在位于 I 区,其次是 II 区和 III 区,而且,异常出现以前,水压力的监测均发生过突变,这种对应关系可以运用到塌陷预报之中。

由于 2000 年、2001 年均采用人工监测,岩溶水(气)压力变化速度采用平均速度,无法得到瞬时速度,并以此预报塌陷。2002 年 5 月 16 日唐朝息家出现的异常与 zk2、zk5 测点的压力变化关系明显,尤其是 zk5 埋设了自动采集的传感器,监测到该点岩溶水压力变化速度为 0.0057kPa/S ,与室内实验得到的临界值相差较大,但渗透坡降为 0.5 左右,已接近室内实验得到的临界值。

从监测结果看,在墙壁裂缝变形监测中,基本上没有监测到变化,说明塌陷发育的突发性,通过裂缝监测难以达到预报目的。

6 地质雷达探测结果

采用 100MHz 的地质雷达天线和连续扫描方式进行监测。2000 完成首轮地质雷达探测一次,布置测线 13 条,2001 年,对测线进行了优化,保留了原有测线 8 条、新增测线 4 条。

表 3 列出三次探测显示的异常点位置。从表可见,2001 年有异常 43 处、2002 年降为 36 处,位

于 I 区的 1、2 号线 2002 年的异常点分别比 2001 年增加 5 个、8 个，这与监测 I 区的 zk、zk7、zk8 具有超过临界速度的水(气)压力波动速度有很好的对应关系。

2002 年探测结果显示，在 1[#]线的 30~40m、2[#]线的 41~47 m 和 10[#]线的 0~3 m 位置，土体扰动已接近地面，极有可能产生新的塌陷。

表 3 地质雷达探测结果对比表

编号	2000 年			2001 年			2002 年			水(气)压力变化情况
	原号	异常范围(m)	深度变化(m)	备注	异常范围(m)	深度变化(m)	备注	异常范围(m)	深度变化(m)	备注
No.1	未测				8~27	3~8	土体扰动	7~14	3~8	土体扰动
					29~40	0.5~8	32m 位置, 约 4m 深发育土洞。	17~22	3~8	土体扰动
								28~42	0.5~9	土体扰动
								43	3~7	土体扰动
								46	3~7	土体扰动
								48	3~7	土体扰动
								45~54	0.5~1.3	土体扰动
No.2	13	36~40	5	明显土洞异常	1~2	3~6	土体扰动	1	3~7	土体扰动
		56~58	6	土层扰动	6~16	2~10	土体扰动	12~15	3~8	土体扰动
					20~34	2~10	28m 位置, 约 4m 深发育土洞。	24	4	土体扰动
					36~50	2~10	43m 位置, 约 5m 深发育土洞。	27	4	土体扰动
					60~71	2~10	67~71m 位置, 3~6m 深发育土洞。	32~33	3~8	土体扰动
								35~37	3~7	土体扰动
								41~49	0.5~7	土体扰动
								65	3~5	土体扰动
No.3	12	8	5	土层扰动	2~10	3~8	5m 位置, 3~4m 深发育土洞。	11~12	2~9	土体扰动
		26~30	5	土层扰动	12	3~8	土体扰动	28~36	0.5~1.8	土体扰动
					22	3~6	土体扰动			
					27	2~6	土体扰动			
No.4	未测				2~5	3~6	土体扰动	3	8~10	土体扰动

					7~10	3~9	8~9m 位置, 3~4m 深发育土洞。	12	8~10	土体扰动	
					12~32	3~10	18~19m 位置, 3~4m ; 25~28m 位置, 3~4m 深发育土洞。	16~17	8~10	土体扰动	
					44~50	3~7	45~48m 位置, 3~4m 深发育土洞。	20~22	8~10	土体扰动	
								46~50	2~5	土体扰动	
No.5	未测				0~5	1~8	2~3m 位置, 3~4m 深发育土洞。	3	3~9	土体扰动	
					6	1~4	土体扰动	7~8	3~9	土体扰动	
					19	3~8	土体扰动				
					22~24	4~7	土体扰动				
No.6	10	28~40	2	土层扰动, 97年曾经严重喷水冒砂	9~11	2~10	10.5m 位置, 约5m 深发育土洞。	2	3~9	土体扰动	位于11号区, 水(气)压力波动速度大于0.085kPa/s, 大于临界值。
					16	4~8	土体扰动	8~11	3~10	9.5m 位置, 3~4m 深发育土洞。	
					18	4~8	土体扰动				
					21	4~8	土体扰动				
					23~24	4~9	23.5m 位置, 约7m 深发育土洞。				
					27~29	4~8	土体扰动				
					33~35	3~8	土体扰动				
					37~43	2~7	土体扰动				
No.7	9	0~8	2	土层扰动	9	4~6	土体扰动	15	3~8	土体扰动	
		48~50	2	土层扰动, 靠近塌陷坑	13	4~5	土体扰动	22	3~8	土体扰动	
					16	4~5	土体扰动	40~47	3~10	土体扰动	
					23~28	4~6.5	土体扰动				
					30	4~5	土体扰动				

					44~45	5~6	土体扰动				
No.8	8			无异常	18~26	3~8	土体扰动	18~27	1.5~4.5	土体扰动	位于IV号区,水(气)压力波动较小。
				无异常	27~34	3~9	土体扰动	29	1.5~7	土体扰动	
No.9	1	10~32	4	土层扰动,反射信号较强,有多次发射,可能与天花板反射有关。	4~7	6~9	土体扰动			无异常	位于III号区,水(气)压力波动较小。
					9~12	6~9	土体扰动				
					19	6~7	土体扰动				
No.10	2	8~16	6	土层扰动			无异常	0~4	0.5~5	1m 位置, 2~3m深发育土洞。	
No.11	6	20~36	5	20~50m 有扰动, 其中20~36m 较严重。	6~9	2~9	土体扰动	2	3~7	土体扰动	
					20~41	1.8~9	土体扰动	5	3~7	土体扰动	
					44~50	0.5~2	土体扰动				
No.12	未测				3~17	1.5~8	土体扰动	1~3	2~10	土体扰动	
					20~21	1.5~8	土体扰动	41~42	3~7	土体扰动	
	3	0~5	3	土层扰动							
	4	22~28	6	土层扰动							
	5	18~23	6	土层扰动							
	7	10	6	土层扰动							
		24	6	土层扰动							
	11	28~40	2	土层扰动							
		90~100	2	土层扰动							

a) 结论

通过本项研究,建成了国内第一个数据自动采集的岩溶塌陷灾害监测站,初步建立了岩溶塌陷预测预报的技术体系与方法,近3年的监测工作表明:

- (1) 在目前的技术条件下,地下水的活动而引发的岩溶地面塌陷是可以进行预测预报的。
- (2) 岩溶塌陷发育临界条件的确定、监测因素的选择、传感器的安装埋设,以及数据自动采集

系统的应用，是开展塌陷预测预报工作的关键。

(3) 本项目采用以岩溶管道裂隙系统中的水(气)压力以及第四系孔隙水压力变化的监测为主、地质雷达监测为辅的方法，是一个有效的预测预报方法。在监测期间发生 12 次地面异常，均与异常点附近监测点的岩溶水 / 气压力突变和第四系底部土层受到较高的渗透力作用有关。

(4) 从传感器监测结果看，

a. 区是最危险的地区，岩溶水 / 气压力变化最为强烈，2002 年岩溶水 / 气压力的变化速度达 0.47kPa/S ，而作用在第四系底部土层的地下水渗透坡降为 $0.17 \sim 3.12$ ，超过了临界条件，因此，该区是最危险的地区。

b. 区在 2000 年、2001 年作用在第四系底部土层的地下水渗透坡降为 0.55、0.79，2002 年渗透坡降达 0.78、岩溶水 / 气压力变化速度为 0.085kPa/S ，也达到了临界破坏条件。

c. 区的地下水渗透坡降较小，2000、2001 和 2002 年分别为 -0.3、0.52 和 0.44。

d. 区的地下水渗透坡降较小，为 -0.44，岩溶水气压力变化速度为 0.012kPa/S 。

(5) 地质雷达可以及时有效地发现土层的浅部异常点，连续三年的探测结果表明，2001 年有异常 43 处、2002 年降为 36 处，位于 I 区的 1、2 号线 2002 年的异常点分别比 2001 年增加 5 个和 8 个，这与监测 I 区的 zk、zk7、zk8 具有超过临界速度的水(气)压力波动速度有很好的对应关系。其它各线的土层仍处在调整中。

(6) 地质雷达发现了 1 线的 30~40m、2 线的 41~47 m 和 10 线的 0~3 m 三个位置，土体扰动已接近地面，极有可能产生新的塌陷。

(7) 监测结果显示，通过墙壁裂缝的人工监测，没有明显变化出现。