

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,2018,37(3):408-414.

DOI:10.11932/karst20180311

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

蒙彦^{1,2},黄健民³,贾龙²

(1.中国地质大学(武汉),武汉 430074;

2.中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004;

3.广州市地质调查院,广州 510440)

摘要:监测预警是岩溶塌陷地质灾害防治领域急需解决的技术难题。文章在总结当前岩溶塌陷监测预警研究现状的基础上,以广州金沙洲地区岩溶塌陷监测为例,通过对不同岩溶塌陷阶段地下水动力条件监测数据分析,发现数据异常值反映了不同工况地下水动态和岩溶塌陷发展阶段的突变关系,以此为基础,通过曲线拟合和残差分析确定了岩溶塌陷预警的置信带。通过对比分析异常值出现最多次数时间,最大及最小异常值出现时间和实际岩溶塌陷发生时间,验证了运用异常数据分析法进行岩溶塌陷预警是可行的,监测数据间隔越密,捕获的异常值越多,预警越准确。

关键词:岩溶塌陷;监测预警;残差分析;置信带;数据突变

中图分类号:P642.26

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)03-0408-07

0 引言

监测预警是岩溶塌陷地质灾害防治的重要技术手段之一,当前国内外使用的监测预警方法可概括为直接监测和间接监测两类。直接监测法包括激光雷达^[1](LIDAR)、合成孔径雷达^[2](INSAR)等遥感监测法,地面地质雷达^[3](RADAR)、电阻率成像^[4](ERT)、微重力^[5](MG)等地球物理方法和光纤传感^[6](BOTDR)等岩土体变形监测法。间接监测法主要为地下水动力条件监测(GDCM)^[7]。

直接监测法具有快速、直观等优点,但在适宜性、有效性、经济性、推广性等方面存在不足^[8]。例如合成孔径雷达(INSAR)等遥感监测法具有快速、覆盖面广等优点,但只能进行地表测量且受植物覆盖影响严重,对于突发性极强的岩溶塌陷预警效果并不理想^[9]。地面地质雷达(RADAR)方法对于探测局部场地的浅层土洞效果较好,但对于未形成土洞的塌

陷、土层含水率较高或者有砂层存在时,误差较大^[10];其他地球物理方法也存在探测多解,费用高,推广难^[11]等缺点。光纤传感监测法是最近几年才被逐渐运用到岩溶塌陷监测预警上来,属于分布式监测法,从理论上可以知道埋设光纤土层内任何一点的变形量和变形位置,但也存在光纤与岩土体同步变形难,受温度影响程度大,仪器昂贵等不足^[12]。

基于地下水动力条件监测的间接预警方法是目前相对成熟的方法,最早由雷明堂提出^[13],目前已在广东、广西、湖南、湖北等多个典型塌陷区成功运用^[14-17]。该方法从岩溶塌陷触发因素入手,通过建立地下水动力条件与岩土体变形之间的关系实现预警,具有原理简单、成本低廉、易于推广等优点,其难点是预警阈值的选取和确定^[7]。当前常用的是室内实验法,其原理是通过室内实验获取土体变形破坏的临界水力坡度作为预警判据,当野外监测值大于临界值时即进行预警^[13]。该方法可以较简便的从宏观上

基金项目:中国地质调查项目(1212011220192,DD20160254)”,国家自然科学基金项目(41302255,41402284)共同资助

第一作者简介:蒙彦(1978-),男,副研究员,研究方向:岩溶地质灾害防治。E-mail:sinkhole@163.com。

收稿日期:2018-02-26

判断岩溶塌陷的易发性,但由于土体结构、性质不均匀,受地下水作用发生变形破坏到形成土洞或塌陷的过程复杂且时间长,因此,运用此方法进行塌陷预警还需要在获取高精度临界水力坡度值等方面进一步改善。在对大量岩溶塌陷监测数据进行分析时,常会发现一些异常值(异常值也称为离群值、极端值或可疑值,是指与其他数值在数量和特征上有差异的数值),其反映了不同工况地下水动态和岩溶塌陷发展阶段的突变关系,这为研究岩溶塌陷预警阈值提供了一种新的思路。

本文以广州金沙洲地下水监测数据为例,通过实

例分析,验证了运用该方法预警岩溶塌陷的可行性,并对结果进行了讨论。

1 研究区概况

1.1 地理位置

金沙洲位于广花盆地南缘,地理座标为东经 $113^{\circ}08'18''\sim 113^{\circ}12'36''$,北纬 $23^{\circ}08'35''\sim 23^{\circ}10'55''$ 。区内地势平坦,交通便利,面积 8.26 km^2 ^[14],属广州市管辖。

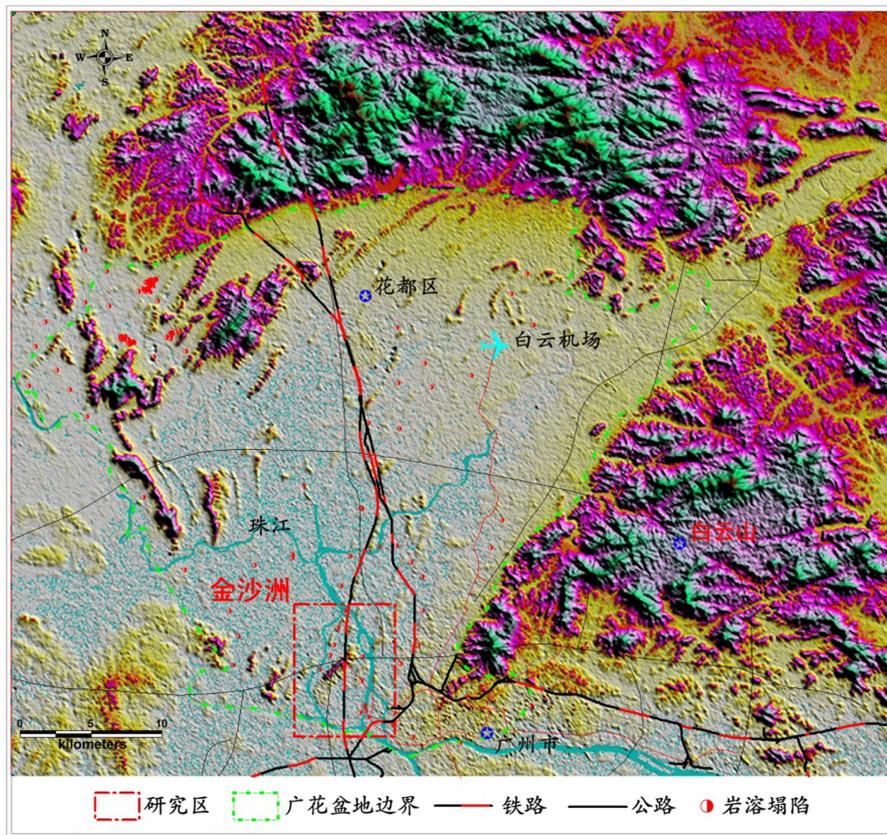


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Map showing location of the study area

1.2 岩溶地质概况

金沙洲属覆盖型岩溶区,局部为埋藏型,盖层厚度一般 $6.8\sim 25.4\text{ m}$,局部厚达 38.1 m ^[14];下伏可溶岩为石炭系石碇子和壶天组灰岩,面积约 3.47 km^2 ,占金沙洲面积的 42% ^[14],局部地区分布白垩系大塍山组灰砾岩。区内岩溶发育程度较强,石碇子组灰岩平均线岩溶率 27.9% ,壶天组灰岩平均线岩溶率

10.5% 。已查明区内发育 7 条小断层,NE 向 5 条 (F1—F5),NW 向 2 条 (F6—F7),断裂对地下水局部流向及岩溶发育产生了重要影响,区内地下水总体自北西南东流动,最终排泄到珠江水系,但由于断层和条带状碎屑岩的阻水作用,存在局部水流系统。自然状态下,区内地下水埋深 $1.3\sim 3.77\text{ m}$,富水性以中等为主,单井涌水量 $153\sim 186\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

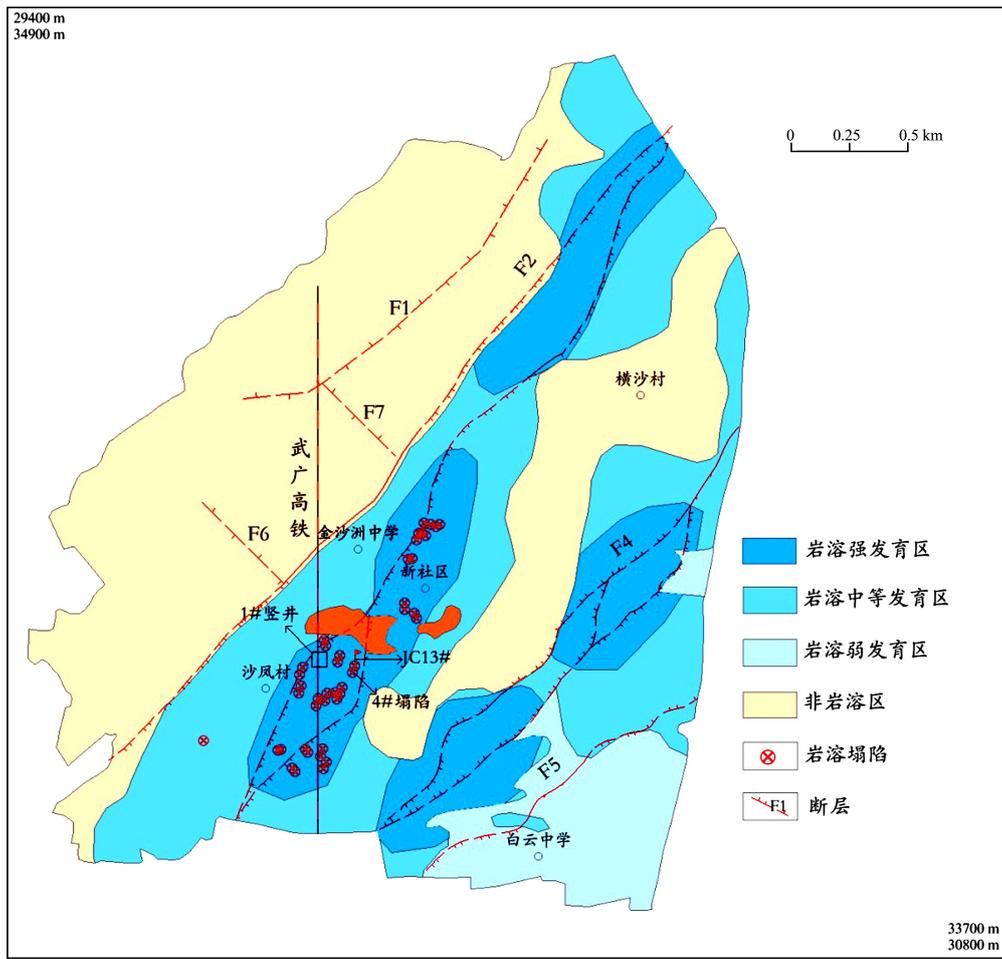


图 2 金沙洲岩溶地质略图

Fig. 2 Sketch karst geologic map of Jinshazhou

1.3 塌陷及监测概况

从 2007 年—2012 年,金沙洲共发生岩溶塌陷 24 宗(图 2),塌陷直径 1.5~18 m,直接经济损失约 2.79 亿元^[14];塌陷由地下水位急剧下降而诱发,据塌陷发生时的监测数据显示,最大水位降幅超过了 30 m^[7]。2012 年以后,由于采取了监测预警和工程治理措施,塌陷数量逐渐减少。根据长期地下水监测数据显示,武广高铁附近降落漏斗至今尚未恢复,岩溶塌陷隐患依然存在。

金沙洲岩溶塌陷监测,总体分为应急(2007 年—2008 年)和长期(2008 年以后)两个阶段。应急监测集中在塌陷高发期,共布置了 9 个监测点。通过一年的实时监测,获取了塌陷发生过程较为完整的地下水动力条件监测数据,为本次预警阈值分析提供了数据基础。本文以 4#岩溶塌陷旁的 JC13#监测点为例进行预警阈值分析(图 3)。

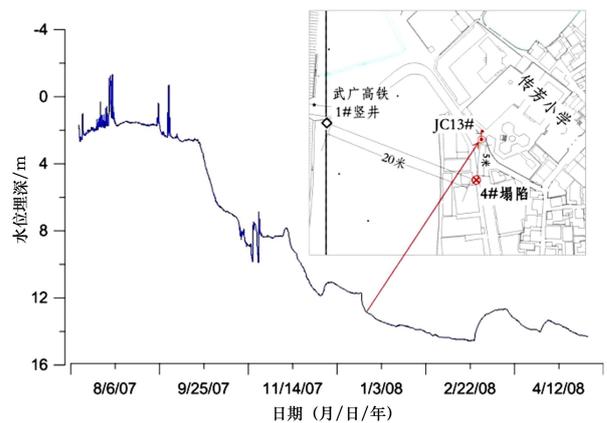


图 3 金沙洲应急监测阶段水位埋深数据曲线 (JC13#, 2007 年—2008 年)

Fig. 3 Curve of water level depths during emergency monitoring stage in Jinshazhou (JC13#, 2007—2008)

2 预警分析

2.1 分析方法

异常值的检验一般需要进行统计分析,常用的方法有:(1)Grubbs 检验、(2)t 检验、(3)Dixon 检验、(4)N air 检验、(5)偏度—峰度检验等,这些方法在某种程度上都有局限性。例如,方法(1)、(4)、(5)中都用全体数据的算术平均值估计总体中心位置参数,稳健性差,容易产生异常值“遮蔽”现象,且方法(1)、(3)通常对检验多个异常值(尤其是在同侧)无能为力,方法(2)、(3)一般仅用于小样本量数据,方法(4)中要求方差已知。考虑到上述缺陷,对本容量较大、异常值个数不明确,的岩溶塌陷监测数据,一般采用残差检验法,残差(e_i)是指实际观察值(y_i)与回归估计值(\hat{y}_i)的差,即:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i (i = 1, 2, \dots, n)$$

显然,有多少对数据,就有多少个残差。残差分析就

是通过残差所提供的信息,分析出数据的可靠性、周期性或其它干扰。首先要检查异常数据。异常数据是指与其它数据产生的条件有明显不同的数据,因此异常数据的残差会特别的大。发现异常数据主要从技术上找原因,当技术上无法找到原因时,就得借助于数理统计方法。

由数理统计方法可以求得残差的置信带:

$$\begin{cases} y - \hat{y} = -2\sigma \\ y - \hat{y} = 2\sigma \end{cases}$$

式中: y 为实际观察值, \hat{y}_i 为预测值, σ 为残差标准差。当数据的残差值落在置信带内则为正常值,否则为异常值,然后通过分析异常值与岩溶塌陷的关系建立判据。

2.2 曲线拟合及阈值

对监测数据按不同塌陷期进行曲线拟合分析,得出残差曲线及数据(图 4)。所有拟合曲线与实测曲线的相关系数均达到 0.9 以上。

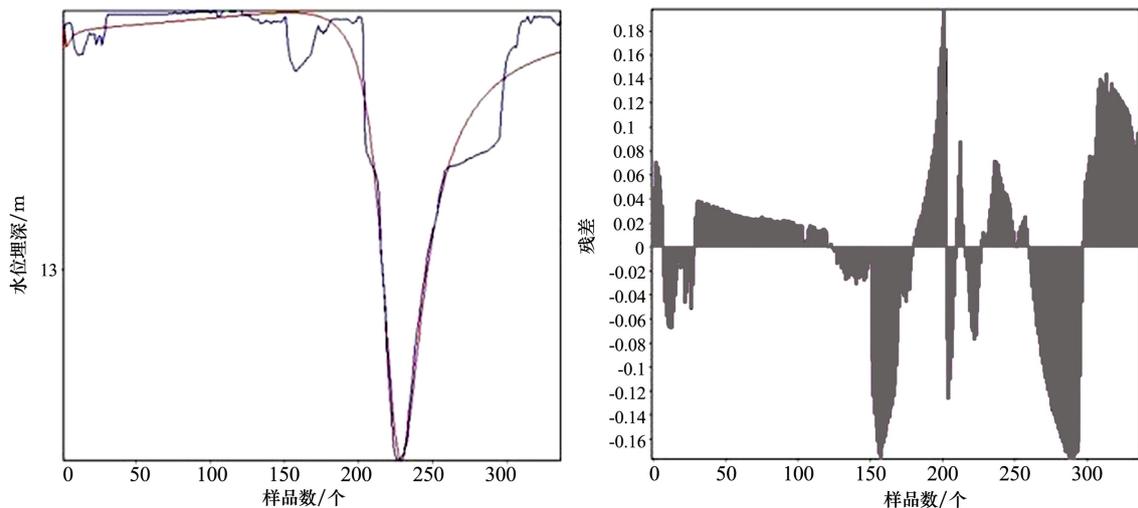


图 4 拟合曲线及残差(JC13#)

Fig. 4 Fitting curve and residuals(JC13#)

表 1 岩溶塌陷监测、计算及残差数据(部分)

Table 1 Part data of monitoring and calculation karst collapse and residuals

序号	时间	实测值/m	计算值/m	残差
1	11/7/2007 18:05	13.714 9	13.643 28	0.071 62
2	11/7/2007 18:10	13.730 7	13.646 69	0.084 01
3	11/7/2007 18:15	13.738 2	13.650 06	0.088 14
.....
.....
334	11/8/2007 21:50	13.732 6	13.898 5	-0.165 9
335	11/8/2007 21:55	13.732 6	13.919	-0.186 4
336	11/8/2007 22:00	13.747 6	13.940 14	-0.192 5

对残差数据进行标准化计算,得出残差的置信带落在置信带外则进行预警。通过对9个塌陷阶段的监测数据分析,得到了不同阶段的置信带。如下表(表2),监测数据落在置信带内则为正常值,

表2 残差置信带

Table 2 Confidence belt of residuals

序号	塌陷时段	残差标准差	置信带
1	2007/07/14-2007/10/28	0.264 439 7	-0.528 879 4~0.528 879 4
2	2007/10/28-2007/11/7	0.007 984	-0.015 967~0.015 967
3	2007/11/7-2007/11/8	0.077 765	-0.155 53~0.155 53
4	2007/11/8-2007/11/9	0.064 254	-0.128 507~0.128 507
5	2007/11/9-2007/11/18	0.145 637	-0.291 274~0.291 274
6	2007/11/18-2008/7/5	1.477 472	-2.954 945~2.954 945
7	2008/7/5-2008/7/11	0.011 239	-0.022 479~0.022 479
8	2008/7/11-2008/9/7	0.027 065	-0.054 13~0.054 131
9	2008/9/7-2008/10/1	0.415 314 09	-0.830 628 18~0.830 628 18

2.3 预测分析

通过统计异常值出现的时间、次数以及最大、最小异常出现的时间,综合来判断预测岩溶塌陷发生的

时间,判断的原则为异常值出现次数最多的时间与出现最大、最小值的时间吻合为岩溶塌陷预报的时间(表3)。

表3 异常值出现与塌陷时间关系

Table 3 Temporal relationship between anomaly appearance and collapse

塌陷时段	异常值日期	次数	最小异常值日期	最大异常值日期	实际塌陷日期
1	10/16/2007	175			
	10/17/2007	288			
	10/18/2007	161			
	10/19/2007	288			
	10/20/2007	123	(-1.602 67)	(1.221 04)	
	10/22/2007	58	10/26/2007	10/28/2007	2007/10/28
	10/23/2007	288	4:15	13:35	18:00
	10/24/2007	44			
	10/25/2007	105			
	10/26/2007	107			
2	10/28/2007	34			
	10/29/2007	41			
	10/31/2007	8			
	11/1/2007	35	(-0.049 82)	(0.017 03)	
	11/2/2007	288	11/2/2007	10/29/2007	2007/11/7
3	11/3/2007	23	8:42	11:15	18:00
	11/4/2007	186			
	11/8/2007	17	(0.192 54)	(0.241 91)	
4			11/8/2007 10:00	11/8/2007 10:50	2007/11/8 22:00
	11/9/2007	26	(-0.201 88)	(0.163 73)	
			11/9/2007 5:35	11/9/2007 5:15	2007/11/9 22:00

续表 3

塌陷时段	异常值日期	次数	最小异常值日期	最大异常值日期	实际塌陷日期
5	11/10/2007	14			2007/11/18 22:00
	11/11/2007	4	(-0.325 42)	(0.869 74)	
	11/15/2007	52	11/15/2007	11/17/2007	
	11/16/2007	8	4:05	9:50	
	11/17/2007	84			
6	7/5/2008	6			2008/7/11 11:00
	7/7/2008	11	(-0.026 84)	(0.028 71)	
	7/11/2008	7	7/8/2008 12:00	7/11/2008 10:40	
7	7/11/2008	2			2008/9/7 12:10
	7/23/2008	53			
	7/26/2008	37	(-0.140 33)	(0.080 63)	
	8/18/2008	10	8/19/2008 8:40	7/11/2008 11:20	
	8/19/2008	72			
	8/20/2008	43			
8	9/8/2008	3			2008/10/1 15:00
	9/8/2008	45			
	9/10/2008	8			
	9/11/2008	22	(-1.304 57)	(1.228 61)	
	9/12/2008	8	9/29/2008 19:00	9/11/2008 1:20	
	9/13/2008	2			
	9/29/2008	31			
9/30/2008	5				
9	11/8/2007	17	(-0.192 54) 11/8/2007 10:00	(0.241 91) 11/8/2007 10:50	2007/11/8 22:00

本次监测数据的采样间隔为 5 min/次(表 1),一天获取的最大监测数据量为 288 个。从表 4 可以看出,异常值出现最大次数的时间一般早于实际塌陷时间 2~5 d;最小异常值出现的时间与塌陷在同一天的有 2 次,早于塌陷时间 2~5 d 的有 5 次;最大异常值出现的时间与实际塌陷时间吻合较好,在塌陷同一天或前一天的有 6 次,占统计总数的 67%。对异常值最大次数、最小异常值、最大异常值出现时间进行综合对比,9 个塌陷时段中有 8 个与塌陷时间基本吻合,只有一个时段误差较大,为 18 d,分析其原因,可能与监测数据的时间间隔(5 min/次)过大有关,监测仪器未能及时捕获到出现的异常值数据,在以后的监测工作中,可采取加密采样间隔(1 min/次)的措施加以分析验证。

3 结 论

(1)地下水监测数据异常值间接反映了地下水波动与岩溶塌陷突变阶段的对应关系。“异常值分析法”以曲线拟合的“残差置信带”作为预警判据,为岩溶塌陷预警阈值获取提供了一种新的思路。

(2)通过对异常值最大次数、最小异常值、最大异常值 3 个指标进行综合分析,发现 9 个塌陷时段中有 8 个与塌陷时间基本吻合,占样本总数的 89%,其中最大异常值出现的时间与塌陷时间吻合最好,占样本总数的 67%,结果证明,运用基于地下水监测数据的“异常值分析法”进行岩溶塌陷预警是可行的,且准确度较高。

(3)该方法尚处于探索阶段,需要更多的岩溶塌陷监测实例验证完善。预警精度与监测点位置、监测

点密度、数据取样间隔等因素密切相关,监测点越多,数据间隔越密,捕获的异常值越多,预警越准确。

参考文献

- [1] Qiusheng Wu, Chengbin Deng, Zuoqi Chen. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models[J]. *Geomorphology*, 2016, 266:1-10.
- [2] Emanuele Intrieri, Giovanni Gigli, Massimiliano Nocentini, Luca Lombardi, Francesco Mugnai, Francesco Fidolini, Nicola Casagli. Sinkhole monitoring and early warning: An experimental and successful GB-InSAR application[J]. *Geomorphology*, 2015, 241(15): 304-314.
- [3] Awni T Batayneh, Abdelruhman A Abueladas, Khaled A Moumani. Use of ground-penetrating radar for assessment of potential sinkhole conditions: an example from Ghor al Haditha area, Jordan[J]. *Environmental Geology*, 2002, 41(8): 977-983.
- [4] M G Ezersky, L V Eppelbaum, A Al-Zoubi, et al. Geophysical prediction and following development sinkholes in two Dead Sea areas, Israel and Jordan[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70 (4):1463-1478.
- [5] Andrzej Kotyba, Lukasz Kortas. Sinkhole hazard assessment in the area of abandoned mining shaft basing on microgravity survey and modelling — Case study from the Upper Silesia Coal Basin in Poland[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 130:62-70.
- [6] Xiaozhen Jiang, Yongli Gao, Yuanbin Wu, et al. Use of Brillouin optical time domain reflectometry to monitor soil-cave and sinkhole formation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75:225.
- [7] Yan Meng, Feng Ji, Long Jia, et al. A new approach for forecasting the appearance of sinkholes near the Jinshazhou tunnel[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71 (8):3339-3347.
- [8] 李瑜,朱平,雷明堂,等. 岩溶地面塌陷监测技术与方法[J]. *中国岩溶*, 2005, 24(2):103-108.
- [9] 吴立新,高均海,葛大庆,等. 基于 D-InSAR 的煤矿区开采沉降遥感监测技术分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(2):32-37.
- [10] 张虎生,兰樟松,张炎孙,等. 地质雷达在瑞金沙州坝岩溶塌陷调查中的应用效果[J]. *物探与化探*, 2000, 24(6):459-463.
- [11] Fuping Gan, Kai Han, Funing Lan, et al. Multi-geophysical approaches to detect karst channels underground-A case study in Mengzi of Yunnan Province, China[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 136: 91-98.
- [12] 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.
- [13] 雷明堂,蒋小珍,李瑜,等. 抽水触发岩溶塌陷的耦合机理与临界条件模型试验研究[A]//2008 年度中国地质科技新进展和地质找矿新成果资料汇编[C]. 2008.
- [14] 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):167-173.
- [15] 戴建玲,罗伟权,吴远斌,等. 广西来宾市良江镇吉利村岩溶塌陷成因机制分析[J]. *中国岩溶*, 2017, 36, (6):283-293.
- [16] 陈亮晶,孙锡良,皮景,等. 湖南宁乡大成桥地区岩溶地面塌陷分布特征及影响因素分析[J]. *中国岩溶*, 2014, 33(4):490-497.
- [17] 沈铭,杨涛,赵新建. 武汉市岩溶地面塌陷监测技术探讨[J]. *资源环境与工程*, 2014, 28(2):177-180.

Early warning threshold of sinkhole collapse based on dynamic characteristics from groundwater monitoring: A case study of Jinshazhou of Guangzhou, China

MENG Yan^{1,2}, HUANG Jianmin³, JIA Long²

(1. School of environmental studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Institute of Guangzhou Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510440, China)

Abstract Karst sinkhole collapse early warning based on monitoring data has long been a prominent technical problem which needs to be solved in the field of geohazard. This paper analyses the current status of sinkhole collapse monitoring and early warning research, and then presents a case study of Jinshazhou of Guangzhou on this issue. The analytical result of groundwater monitoring data shows that the data anomalies largely reflect the abrupt change of groundwater dynamic and the stage of relevant karst collapse development. On this basis, through curve fitting and residual analysis this work determines the confidence belt of sinkhole collapse early warning. Comparing the times of most frequent anomalies, occurrence of maximum and minimum outliers, and the actual times of karst collapse, it is confirmed that it is feasible to use the anomaly data analysis method to make early warning of sinkhole collapse. With shorter monitoring data intervals, capturing more anomalies, the early warning will be more accurate.

Key words karst sinkhole collapse, monitoring and early-warning, residual analysis, confidence band, data mutation

(编辑 张玲)