

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.13

湖北武汉市三环区岩溶地面塌陷发育规律及危险性评价

廖 康, 吴益平, 郭进雪, 张龙飞

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着武汉市城市化建设的不断推进,岩溶地面塌陷问题日益凸显。为了揭示其发育规律及进行危险性评价,充分收集岩溶地面塌陷地质灾害调查统计成果,结合基本的工程地质条件和碳酸盐岩的发育情况、分带特征,得出岩溶地面塌陷的时间和空间分布特征。在探明其发育规律的基础上,确定研究区岩溶地面塌陷形成的影响因素,进而建立武汉市三环区岩溶地面塌陷危险性评价指标体系。采用数量化理论得出研究区的危险性等级分区类型:高危险区、较高危险区、较低危险区、低危险区、非岩溶区。综合岩溶地面塌陷发育规律及危险性分区,分析得出各部分区域特征,可在一定程度上指导工程建设和灾害治理。

关键词: 岩溶地面塌陷;工程地质条件;数量化理论;危险性评价

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)02-0078-08

Development law and risk assessment of karst ground collapse in the Third Ring Road Area of Wuhan, Hubei Province

LIAO Kang, WU Yiping, GUO Jinxue, ZHANG Longfei

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: With the advancement of urbanization in Wuhan, karst ground collapse is becoming more and more prominent. In order to reveal its development law and risk assessment, we collect the statistical results of geological disasters of karst ground collapse adequately. Besides, we combine the basic engineering geological conditions and the development law of carbonate rocks. Through the above analysis, we acquire karst ground collapse's time and space distribution characteristics. Based on the study of its development law, the influencing factors of formation of karst ground collapse in the study area are determined, and the risk evaluation index system of karst ground collapse in Wuhan is established. The risk level of the study area is obtained by the quantitative theory. The types of zones are: high-risk area, lower high-risk area, lower-risk area, low-risk area and non-karst area. Combined with karst ground collapse development law and risk partition, we acquire the characteristics of various areas and guide the construction and disaster control to a certain extent.

Keywords: karst ground collapse; engineering geological conditions; quantitative theory; risk assessment

0 引言

岩溶地面塌陷是指可溶岩洞、隙上方的岩、土体在

自然或人为因素作用下发生变形破坏,并在地面形成塌陷坑的一种岩溶动力作用与现象,是下伏的溶洞在内、外营力综合作用下失稳的现象^[1-2]。

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-07-06

基金项目: 武汉城市地质调查; 基于 GIS 的地质灾害风险评价(2011CB710606)。

第一作者: 廖 康(1993-),男,四川安岳人,地质工程专业,博士,主要从事岩土工程及工程地质相关学习及研究工作。E-mail: 774147727@qq.com

通讯作者: 吴益平(1971-),女,浙江杭州人,博士,教授,主要从事岩土工程及工程地质相关的教学及科研工作。E-mail: ypwu@cug.edu.cn

近几十年来,随着岩溶地面塌陷日益频发,越来越多的出现在人们视野中,对其的研究也在不断的细化和深入。20 世纪 80 年代,将遥感、GIS 技术、系统分析方法、数学方法及模型模拟方法应用于岩溶地面塌陷,使其由定性研究转为试验模拟、定量或半定量分析研究,有代表性的做了不同覆盖层塌陷过程的定性模型试验研究^[3-5]。20 世纪 90 年代至今,重点研究方向为基于计算机技术的岩溶数据库建立和区域岩溶塌陷危险性预测研究,利用数学、弹性力学理论并结合数值模拟方法对土洞的稳定性进行研究^[6-8]。随着理论水平和计算机技术的发展,基于模糊数学理论、神经网络理论、地理信息系统(GIS)技术和灰色理论的应用^[9-14]使得岩溶地面塌陷评价更趋多元化、科学化。在我国,统计学理论和专家经验分析法是评价岩溶塌陷危险性的常用方法。经过数十年不懈努力,目前对岩溶地面塌陷的研究已经取得了显著成果,许多创新的方法和理论在国际上有着引领作用。

近年来,随着武汉市城市建设的圈层式进行,逐渐形成了以主城区三环线为中心的城市结构。在城市规划建设的同时,岩溶地面塌陷事故也不断涌现。一些专家学者在综合塌陷资料基础上,对岩溶地面塌陷展开多方面研究,取得了较大的成果。如郑先昌,卫中营^[15]对武汉市岩溶地面塌陷诱发因素进行了分析,论述了塌陷区的产生是多因子复合作用的结果(地质环境条件、水文地质概况、岩溶地质特征);冯永^[16]针对武汉市岩溶地面塌陷机制及危险性进行了研究,将武汉市岩溶地面塌陷模式分为三类,结合不同区域岩溶地面塌陷易发性的发生概率和危险性,对危险性等级进行了分区;钟宇等^[17]基于 GIS 对武汉市武昌区岩溶塌陷进行了危险性评价,论文选取若干致灾因子,运用模糊算法和组件式 GIS 技术对研究区岩溶塌陷危险性等级进行评估,得到武昌区岩溶塌陷危险性等级区划图。以上研究均取得了较好的成果,为后续研究提供了思路。

本论文基于“武汉城市地质调查——基于 GIS 的地质灾害风险评价”项目,在前人长期、大量的研究基础上,收集已有资料,形成局部岩溶地面塌陷数据库,结合 GIS 进行统计分析,对武汉市三环区岩溶地面塌陷的发育规律和危险性进行了研究。

1 研究区工程地质概况

武汉市位于湖北省东部,素有九省通衢之称,为湖北省的省会城市,有交通枢纽地位和战略意义。市内

以丘陵和平原相间的波状起伏地形为主,形成以平原为主体,兼有少量低山、丘陵的基本地貌。本文以武汉市三环线内为研究区,包括武昌区全部、江汉区、硚口区、江岸区、洪山区、汉阳区、青山区大部分区域,总面积约 474 km²。研究区地理位置图见图 1。



图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location of study area

研究区属扬子陆块区下扬子陆块之鄂东南褶皱带的四级构造单元—武汉台地褶皱带。区域内出露地层有古生代志留纪、泥盆纪、石炭纪、二叠纪地层,中生代三叠纪、侏罗纪地层,新生代白垩纪地层及大范围的第四纪地层。区内水资源丰富,湖泊密布,江河纵横,交汇形成以长江为主体的巨大水系网络。遥感显示水域面积达 99 km²,占研究区总面积的 20.9%。

2 研究区岩溶地面塌陷发育规律

2.1 碳酸盐岩发育分布规律

研究区内分布地层中,石炭系、二叠系、三叠系为含碳酸盐岩的地层。碳酸盐岩在空间上分布较有规律:总体上呈近东西向成条状分布,自北向南共计六条碳酸盐岩条带(图 2),包括天兴洲条带(L1)、大桥条带(L2)、白沙洲条带(L3)、沌口条带(L4)、军山条带(L5)、汉南条带(L6)。本文研究区主要涉及 L1 条带局部及 L2、L3 条带大部分,在图 2 中用红色线条圈出。

据统计资料显示,研究区内的三个碳酸盐岩条带中,天兴洲条带(L1)仅在天兴洲大桥南侧 15~20 号墩勘察中出现地面塌陷。大桥条带(L2)在汉阳琴台大道墨水湖南路发生过岩溶地面塌陷。白沙洲条带(L3)在汉阳区的鹦鹉街中南轧钢厂和拦江路,武昌区白沙洲大道沿线附近的白沙洲街长江紫都、烽火村、武泰闸路、阮家巷、陆家街、青菱乡,洪山区红旗村红旗欣

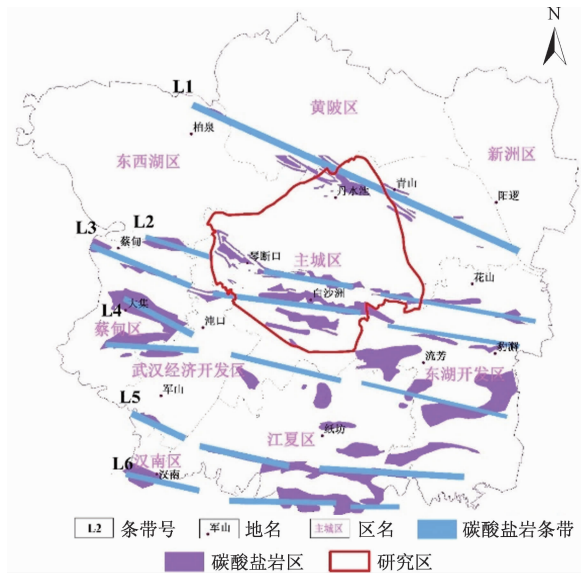


图2 武汉市碳酸盐岩分布简图

Fig.2 Distribution diagram of carbonate rocks in Wuhan

居、白沙洲大道张家湾路等地发生过岩溶地面塌陷。据此可知该条带岩溶发育,岩溶地面塌陷频繁发生,是岩溶地面塌陷重灾区,已造成了严重的人员伤亡和财产损失。

2.2 岩溶地面塌陷时间分布特征

分析武汉市历年来气象水文资料数据^[18]可见:发生的岩溶地面塌陷在时间分布上具有一定的规律性,即大多数发生于4~8月。数据显示,武汉市降雨集中在4~8月份,境内长江水位在4~10月为平水期及丰水期,其中6~8月为洪峰期。故塌陷灾害的发生与雨水密切相关。受降雨及雨量周期变化的影响,区内岩溶地面塌陷发育明显具有一定的周期活动规律。目前为止,研究区内统计的岩溶地面塌陷共30处,统计结果如表1所示。

从表中可以分析得出:区内发育的岩溶地面塌陷有22个发生于4~8月,占总塌陷个数的73%。4~8

表1 研究区岩溶地面塌陷统计表

Table 1 Statistical table of karst ground collapse in study area

编号	区名	灾害点位置	发生时间	塌陷面积/m ²	诱发因素	诱发方式
1	武昌区	丁公庙	1931. 7. 27	-	自然	潜蚀、重力
2		武庆堤	1983	146	自然	潜蚀、重力
3		阮家巷	1983. 7. 14	550	自然+人为	降雨、人工加载
4		陆家街中学	1988. 5. 10	416	自然	潜蚀、重力
5		涂家沟市司法学校	2000. 2. 22	350	自然	潜蚀、重力
6		阮家巷	2005. 8. 22	80	自然	降雨
7		长江紫都	2006. 4. 9	130	人为	钻探、降雨
8		武泰闸路段	2009. 6. 10	45	人为	降雨、钻探
9		武泰闸路段	2009. 12	150	人为	钻探
10		南湖红旗村	2011. 5. 5	420	人为	道路施工
11		民政学校	2011. 12. 21	100	人为	道路施工
12		汇东佳韵小区旁	2012. 2. 3	250	人为	钻探
13	洪山区	青菱乡毛坦港	1994. 4	180	自然	潜蚀、重力
14		青菱乡毛坦港小学	1999. 4. 22	250	自然	潜蚀、重力
15		烽火村乔木湾	2000. 4. 6	3 470	人为	抽取地下水
16		青菱乡烽火村	2005. 8	18	自然	降雨
17		烽火村路段	2009. 6. 17	95	人为	振动、加载
18		烽火村附近路段	2009. 6. 27	160	人为	钻探、加载
19		张家湾八坦路	2009. 8. 28	70	人为	桩基施工振动
20		张家湾白沙洲大道	2009. 11. 24	480	人为	桩基施工振动
21		烽火村钢材市场	2009. 12. 22	238	人为	施工振动
22		青菱乡张家湾南湖变电站	2010. 7. 19	60	人为	钻孔施工
23		白沙洲大道	2010. 8. 13	41	人为	施工振动
24		青菱乡光霞村五组	2010. 8. 15	160	人为	施工振动
25		青菱乡毛坦港	2013. 4. 21	148	人为	钻探
26		青菱乡光霞村	2013. 9. 5	130	人为	钻探
27		烽火村还建项目	2014. 6. 4	150	人为	钻探
28	汉阳区	中南扎钢厂	1977. 9. 2	717	人为	抽取地下水
29		鹦鹉大道锦绣长江	2015. 8. 7	32	人为	钻孔施工
30		鹦鹉大道锦绣长江	2015. 8. 10	41	人为	钻孔施工

月为长江丰水期阶段或平水期与丰水期转换阶段,是岩溶地面塌陷发生的最危险时段。季节性降雨导致雨水大量进入土体,改变原有的土体结构,给岩溶地面塌陷的产生提供了内在条件。此外,由于人类工程活动的影响,从外部诱发岩溶地面塌陷灾害的产生,使得灾害具有明显的时间分布规律。

2.3 岩溶地面塌陷空间分布特征

区内已有资料的岩溶地面塌陷共计30处,分析发现:白沙洲条带即L3条带呈现高度的集中性,共计16处曾发生过岩溶地面塌陷地质灾害,且多处具有重复性,成片分布,发生频繁,危害严重。究其根本,此条带受地层岩性、地质构造、地形地貌、水文地质条件及人类活动的控制和影响,致使研究区内岩溶地面塌陷灾害在空间分布上具有相对集中性,即分布的区域相对集中。具体特征表现如下:

2.3.1 地层岩性

白沙洲条带基岩为三叠系可溶性碳酸盐岩,岩性为灰岩、生物碎屑灰岩,直接隐伏于第四系全新统粉细砂层之下,质纯,岩溶发育。

2.3.2 地质构造

岩溶地面塌陷地段为区内褶皱轴部或附近以及断层发育地段,这些区域为岩溶的发育提供了良好的发育空间,同时该区域岩层断裂产生裂隙,为地下水活动提供了良好的通道。

2.3.3 地形地貌

白沙洲条带岩溶地面塌陷灾害均位于长江一级阶地前缘及中部,为长江古河道所在地。在长期的雨水冲刷和切割作用下,区域的可溶性岩更易暴露出来,是岩溶地面塌陷发育的主要场所。

2.3.4 水文地质条件

塌陷区多在岩溶裂隙水分布区域,这些区域水资源丰富,流动性强,有利于溶洞的发育,对岩溶地面塌陷的形成起到了控制性的作用。

2.3.5 人类活动

人类工程活动主要包括地下水开采、钻孔扰动和爆破等。研究区塌陷密集区域存在大量的人类工程活动,包括地铁轨道施工、城市建设、堆载、地下水开采等。目前区内统计的塌陷灾害显示,其大多直接或间接与人类活动相关。

以上各因素之间相互影响、综合作用下使得研究区岩溶地面塌陷在空间上具有一定的相对集中性,即塌陷多发区较为集中,区域也相对集中。

3 岩溶地面塌陷危险性评价

3.1 危险性评价模型

本文采用数量化理论Ⅲ作为危险性评价的模型^[19-20]。模型将定性变量叫做项目,把定性变量的各种不同的取“值”叫做类目。设有 n 个样品,每个样品有 s 个定量变量, m 个项目,其中第 j 个项目有 r_j 个类目,即每个样品共有 $r = \sum r_j$ 个类目,由此可排成一个 $n \times (r + s)$ 阶矩阵,称为反应矩阵并记作:

$$X = \begin{bmatrix} \delta_{1(1,1)} & \cdots \delta_{1(1,r_1)} & \cdots & \delta_{1(m,1)} & \cdots \delta_{1(m,r_m)} & u_{11} & \cdots & u_{1s} \\ \delta_{2(1,1)} & \cdots & \delta_{2(1,r_1)} & \cdots & \delta_{2(m,1)} & \cdots & \delta_{2(m,r_m)} & u_{21} & \cdots & u_{2s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{n(1,1)} & \cdots & \delta_{n(1,r_1)} & \cdots & \delta_{n(m,1)} & \cdots & \delta_{n(m,r_m)} & u_{n1} & \cdots & u_{ns} \end{bmatrix}$$

其中各样品对应类目的反应度:

$$\delta_{i(j,r_j)} = \begin{cases} 1, & \text{在 } i \text{ 样品中 } j \text{ 项目的定性数据是 } r_j \text{ 类目时} \\ 0, & \text{在 } i \text{ 样品中 } j \text{ 项目的定性数据不是 } r_j \text{ 类目时} \end{cases}$$

式中: $\delta_{i(j,r_j)} (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m)$ 为第 i 样品在 j 项目之 r_j 类目上的反应; s 列中 $u(i,k) (1 \leq k \leq s)$ 是 k 定量变量在 i 样品中的取值。

设所要求的变量的得分以 $r + s$ 维向量的形式表示:

$$b = (b_{11}, \cdots, b_{1r_1}, \cdots, b_{m1}, \cdots, b_{mr_m}, a_1, \cdots, a_s)^T \quad (1)$$

式中: b ——各变量得分。

第 i 个样品的平均得分为:

$$y_i = \frac{1}{m + s} \left(\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} b_{jk} \delta_{i(j,k)} + \sum_{l=1}^s a_l u_{il} \right), \text{ 记}$$

$$y = (y_1, y_2, \cdots, y_n)^T \text{ 即 } y = \frac{1}{m + s} Xb \quad (2)$$

式中: y_i ——第 i 个样品平均得分, y 为单样品得分。

记各样品在 j 项目的 k 类目上的反应之和为:

$$g_{ik} = \sum_{i=1}^n \delta_{i(j,k)}, j = 1, 2, \cdots, m, k = 1, 2, \cdots, r_j$$

$$g = (g_{11}, \cdots, g_{1r_1}, \cdots, g_{m1}, \cdots, g_{mr_m}, \overbrace{0, \cdots, 0}^{s \uparrow})^T \quad (3)$$

式中: g_{ik} ——各样品 j 项目的 k 类目上的反应之和。

故得所有样品得分的总平均值为:

$$\bar{y} = \frac{1}{n(m + s)} g^T b \quad (4)$$

式中: $\bar{y}$ ——所有样品得分的总平均值。

各样品间的组间方差为:

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n(m + s)^2} b^T (X^T X - \frac{gg^T}{n}) b$$

$H = X^T X - \frac{gg^T}{n}$, 则有:

$$n(m+s)^2\sigma_b^2 = \mathbf{b}^T \mathbf{H} \mathbf{b} \quad (5)$$

式中: σ_b^2 ——各样品间的组间方差。

故样品总方差有:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n(m+s)} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} (b_{jk} \delta_{i(j,k)} - \bar{y})^2 \delta_{i(j,k)} + \sum_{l=1}^s (a_l u_{il} - \bar{y})^2 \right] = \frac{1}{n(m+s)} \left(\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} b_{jk} \delta_{i(j,k)} + n \sum_{l=1}^s a_l^2 \right) - \bar{y}^2$$

记 $r+s$ 阶对角矩阵:

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & & & & & & 0 \\ & \ddots & & & & & \\ & & g_{1r_1} & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & g_{m1} & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & g_{mr_m} \\ & & & & & & & n \\ & & & & & & & & \ddots \\ 0 & & & & & & & & & n \end{bmatrix}$$

$$n(m+s)^2\sigma_b^2 = \mathbf{b}^T \mathbf{G} \mathbf{b} - \frac{1}{n(m+s)} \mathbf{b}^T \mathbf{g} \mathbf{g}^T \mathbf{b} = \mathbf{b}^T \mathbf{L} \mathbf{b} \quad (6)$$

式中: σ^2 ——样品总方差;

G —— $r+s$ 阶对角矩阵。

其中:

$$\mathbf{L} = \mathbf{G} - \frac{1}{n(m+s)} \mathbf{g} \mathbf{g}^T$$

结合式(5)和(6),即得组间方差与总方差的相关比为:

$$\eta^2 = \frac{\sigma_b^2}{\sigma^2} = \frac{\mathbf{b}^T \mathbf{H} \mathbf{b}}{(m+s) \mathbf{b}^T \mathbf{L} \mathbf{b}} \quad (7)$$

式中: η^2 ——组间方差与总方差的相关比。

联合以下条件公式

$$\begin{cases} \mathbf{b}^T \mathbf{L} \mathbf{b} = 1 \\ \mathbf{g}^T \mathbf{b} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

结合式(7)和(8),得到如下广义特征方程:

$$\mathbf{H} \mathbf{b} = \lambda (m+s) \mathbf{L} \mathbf{b} \quad (9)$$

式中: λ ——方程的特征值。

显然,使相关比 η^2 最大且满足条件公式(8)的解 $\mathbf{b}$ 为广义特征方程(9)最大特征根 λ 所对应的特征向量。

3.2 指标体系的建立

该模型的危险性评价指标体系包括:第一层目标

层(A),第二层一级指标层(B),第三层二级指标层(C)。区域岩溶地面塌陷危险性主要受控于工程地质条件及外界诱发因素。综合研究区岩溶地面塌陷的地质因素、诱发因素及已有资料,选取 11 个评价指标,建立岩溶地面塌陷危险性评价指标体系(表 2)。

表 2 研究区岩溶地面塌陷危险性评价指标体系表

Table2 Risk assessment index system of karst ground collapse in research area

目标层(A)	一级指标层(B)	二级指标层(C)
研究区岩溶地面塌陷危险性评价	岩溶基础条件(B1)	地层岩性(C1)
		线岩溶率(C2)
	上覆盖层条件(B2)	上覆盖层厚度(C3)
		上覆盖层结构(C4)
		地貌类型(C5)
	地质构造(B3)	断裂缓冲带距离(C6)
	水文地质条件(B4)	地下水类型(C7)
		地下水涌水量(C8)
		地下水埋深(C9)
		距长江水系距离(C10)
	诱发因素(B5)	人类工程活动强度(C11)

利用 ArcGIS 软件标识功能,用研究区已发生岩溶地面塌陷点坐标信息生成点文件,并用其标识每个评价指标面文件,计算得到每项评价指标中各分级状态下对应的灾害点密度,进行归一化处理后得到以下评价指标分级标准。

结合岩溶地面塌陷危险性评价指标体系,利用数量化理论Ⅲ基本原理,以研究区拥有记录的 30 个岩溶地面塌陷点作为基准变量,将 C1、C3、C4、C5、C6、C7、C8、C10、C11 这 9 个评价指标作为类目,定量变量为 C2 和 C9。

其中,C1-1~C1-5 分别代表地层岩性为三叠纪(T),石炭纪(C),二叠纪(P),白垩纪(K)、早第三纪(E),志留纪、泥盆纪、晚第三纪(S、D、N)。C2-1~C2-4 分别代表线岩溶率大于 30%、20%~30%、10%~20%、0~10%。C3-1~C3-7 分别代表上覆盖层厚度小于 20 m、20~22 m、22~24 m、24~26 m、26~28 m、28~30 m、大于 30 m。C4-1~C4-3 分别代表上覆盖层结构为双层、单层、裸露型。C5-1~C5-4 分别代表地貌类型为冲积湖积平原、冲积堆积平原、剥蚀堆积平原、剥蚀丘陵。C6-1~C6-5 分别代表断裂缓冲带距离分别为 300 m、600 m、900 m、1 200 m、1 300 m。C7-1~C7-5 分别代表地下水类型为岩溶裂隙水、全新统孔隙承压水、碎屑岩类裂隙水、第四系孔隙潜水、非含水层。C8-1~C8-4 分别代表地下水涌水量大于 1 000 m³/d、500~1 000 m³/d、0~500 m³/d、0。C9-1~C9-3 分别代表地下水埋深

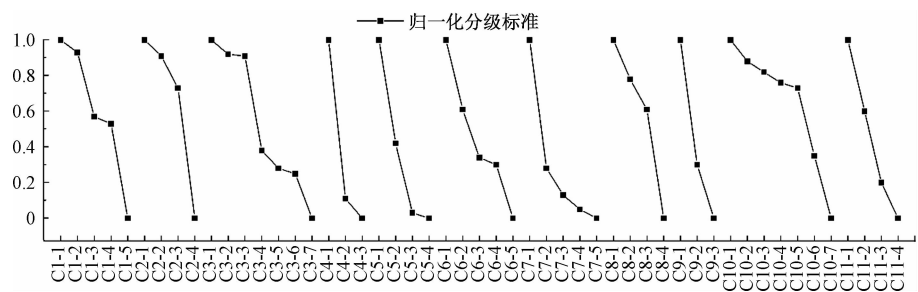


图 3 单因素评价指标分级标准图

Fig. 3 Single factor evaluation index grading standard figure

为 0 ~ 5 m、5 ~ 10 m、大于 10 m。C10 - 1 ~ C10 - 7 分别代表距长江水系距离为小于 500 m、500 ~ 1 000 m、1 000 ~ 1 500 m、1 500 ~ 2 000 m、2 000 ~ 2 500 m、2 500 ~ 3 000 m、大于 3 000 m。C11 - 1 ~ C11 - 4 分别代表人类工程活动强度为强、中、弱、无(图 3)。

理论模型最终求解得到最大特征根 λ 及其对应的特征向量 b , 它们的几何意义为: 以特征向量 b 为因子轴, 样品得分为样品向量在该轴方向上的投影, 对应的最大特征根 λ 为使这个轴上的投影具有最大的相关比方向。进行多维度分析时, 取前 k 个 λ 及其所对应的特征向量 b_k 进行分析, 且满足 $\sum \eta^2$ 最大化的趋近于 1。

由基准变量、类目及定量变量组成的反应矩阵经

数理化原理计算后可得到相关比 η^2 。经计算, 得到前 3 个最大特征值 $\lambda_1 = 0.172\ 8$, $\lambda_2 = 0.143\ 7$, $\lambda_3 = 0.084\ 7$, 即得到相关比前三所对应的 $\lambda = (0.172\ 8, 0.143\ 7, 0.084\ 7)$ 。根据相关比 η^2 由大到小取值, 计算得各特征根所代表的信息量总和 (即 $\sum \eta^2$) 为 95.54%, 该信息量基本可以表征岩溶地面塌陷影响因素的所有信息。

根据数量化理论 III 的几何意义, 得到各类目到原点的空间距离 l 。在空间距离 l 的基础上, 以得分范围作为表征对项目的贡献筛选。岩溶地面塌陷各评价指标 (即项目) 的得分范围可由公式 $R = \max l_{jx} - \min l_{jk} (1 \leq x, k \leq r_j, 1 \leq j \leq m)$ 得到, 计算结果如表 3 所示。

表 3 岩溶地面塌陷危险性指标贡献得分表

Table 3 Responsibility score of karst ground collapse risk index

指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
R	0.370 1	0.431 2	0.406 2	0.200 3	0.150 9	0.435 9	0.176 3	0.392 4	0.208 1	0.194 4	0.532 2

根据各评价指标贡献度, 综合评价指标分级标准, 得到数量化理论模型下岩溶地面塌陷危险性分区结果见图 4。

3.3 危险性评价结果分析

从危险性评价结果来看, 不同分区的地层岩性、地形地貌、人类工程活动等的影响都有较大的差异, 具体的分析如下:

(1) 高危险区主要位于白沙洲条带 (L3), 分布在长江两岸, 包括武昌陆家街、洪山青菱烽火村、白沙洲街长江紫都、汉阳的中南轧钢厂。上覆盖层为粘土层或单砂层, 黏土或单砂层厚度较小, 盖层厚约 28 ~ 30 m。下伏石炭系、二叠系、三叠系碳酸盐岩岩溶发育程度高, 距水系、断层等地质构造距离较近, 为塌陷的发生创造了内在条件。此外, 高危险区内人类工程活动强度较高, 地下水位下降幅度大, 同时, 降雨作用进一步加速了灾害的发生。已有资料显示, 研究区内

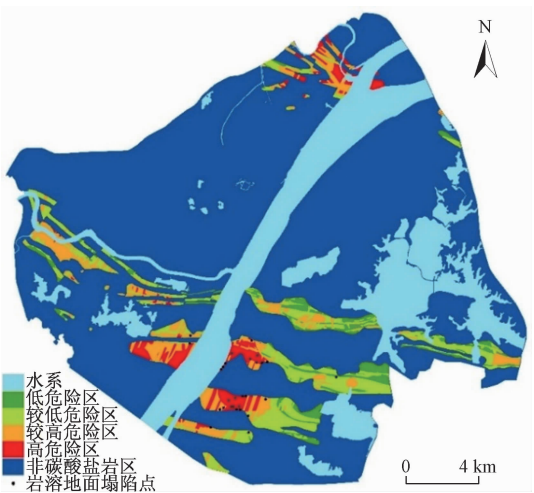


图 4 研究区岩溶地面塌陷危险性分区图

Fig. 4 Risk zone map of karst ground collapse in the study area

发生过的岩溶地面塌陷基本位于高危险区, 为灾害重

点防治观测区域。

(2) 较高危险区主要沿高危险区附近 $1 \sim 2 \text{ km}^2$ 范围分布。该区的地层岩性及上覆盖层发育与高危险区相似,碳酸盐岩地层岩溶发育较高,上覆盖层为黏土层或单砂层,黏土或单砂厚度较小,盖层厚约 $26 \sim 30 \text{ m}$ 。危险区内岩溶水、孔隙水、长江水水力联系密切,地下水位波动较强。由于该区碳酸盐岩地层距水系、断裂等比高危险区要稍远,故受水系、断裂的影响也相对弱化。

(3) 较低危险区主要分布于研究区内各碳酸盐岩条带东部。区内岩溶发育微弱,溶洞规模小,发育程度低。上覆盖层为单黏土层或黏砂二元结构,黏砂厚度较大,不利于塌陷形成。此外,地下水受长江水位波动影响较小,水力联系较弱,有效防止了塌陷的产生。

(4) 低危险区与较低危险区穿插交互,也基本分布于研究区内各碳酸盐岩条带东部。区内岩溶基本不发育或发育微弱,难以形成一定规模的溶洞,基本不存在岩溶地面塌陷的危险。

(5) 非岩溶区下伏基岩为志留系、泥盆系等,地层中无碳酸盐岩分布,缺少岩溶地面塌陷形成的必要条件,故不存在岩溶地面塌陷的危险。

从危险性分区评价结果得知,受控于碳酸盐岩的分布、岩溶的发育程度及人类工程活动等影响,危险性较高区域的上覆盖层为上黏下砂的二元结构类型,靠近长江的一级阶地,水资源丰富,故岩溶地面塌陷成灾概率较大。结合研究区内已发生的岩溶地面塌陷灾害统计资料,将其与岩溶地面塌陷危险性评价分区结果进行对比,发现其结果与实际情况较为吻合,符合岩溶地面塌陷已有的发育规律,有效证实了本文采用的模型和危险性评价分析正确性。

4 结论

通过对武汉市三环区岩溶地面塌陷地质灾害资料的分析统计,综合研究区工程地质条件及岩溶碳酸盐岩发育规律与特征,得出岩溶地面塌陷的发育规律。在此基础上,进一步利用数量化理论模型完成了研究区的危险性等级分区。本次研究主要结论如下:

(1) 岩溶地面塌陷在时间分布上与降雨关系密切,灾害多发生在降雨相对集中的时间段;空间分布上具有相对集中性,即塌陷主要分布于白沙洲条带(L3)靠近长江的区域,受地层岩性、地质构造、地形地貌、水文地质条件及人类活动的控制和影响。

(2) 基于数量化理论模型的岩溶地面塌陷危险性评价结果,高危险区分布在 L3 碳酸盐岩条带长江沿

岸,分布范围和面积较广;这与碳酸盐岩的发育分布规律吻合,同时已有的岩溶地面塌陷记录也表明,此区域范围为灾害高发区。

(3) 塌陷发生的区域,主要分布于石炭系、二叠系、三叠系地层中。这些地层距水系、褶皱和断层等地质构造距离较近,为岩溶的发育提供了良好的发育空间。同时这些岩层富含碳酸盐岩,容易断裂产生裂隙,为地下水活动提供了良好的通道,故岩溶发育强烈。在地下水的动力作用下,外部降雨及人类工程活动极易诱发岩溶地面塌陷,属于岩溶地面塌陷灾害高危险性地层。

(4) 岩溶地面塌陷危险性高的区域上覆盖层形成上黏下砂的二元结构。该结构类型有效控制了土洞的发育快慢,而土洞的形成是岩溶地面塌陷的前提,故区内上覆盖层结构类型是决定能否发生坍塌,产生岩溶地面塌陷的关键因素之一。

(5) 选取合适的危险性评价指标体系,采用数量化理论模型对研究区岩溶地面塌陷的危险性进行分析评价,其所反映的信息量和评价准确性均得到了较好的实际验证,对以后研究此类问题有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 陈国亮. 岩溶地面塌陷的成因与防治[M]. 中国铁道出版社,1994.
CHEN Guoliang. Causes and prevention of Karst ground collapse [M]. China Railway Publishing House,1994.
- [2] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 化学工业出版社,2008.
TANG Huiming. Fundamentals of engineering geology [M]. Chemical Industry Press,2008.
- [3] 金晓文,陈植华,曾斌,等. 岩溶塌陷机理定量研究的初步思考[J]. 中国岩溶,2013,32(4):437-446.
JIN Xiaowen, CHEN Zhihua, ZENG Bin, et al. Preliminary thinking of quantitative research on the mechanism of karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 2013,32(4):437-446.
- [4] 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.
LI Yu, ZHU Ping, LEI Mingtang, et al. Monitoring technique and methods of the karst collapses [J]. Carsologica Sinica,2005,24(2):103-108.
- [5] Beck B F. Engineering and Environmental Impacts of Sinkholes and Karts[J]. Crc Press,1989.
- [6] 刘秀敏,陈从新,沈强,等. 覆盖型岩溶塌陷的空

- 间预测与评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2785 - 2790.
- LIU Xiumin, CHEN Congxin, SHEN Qiang, et al. Spatial prediction and evaluation of collapse of covered karst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2785 - 2790.
- [7] Deborah J. Goodings, Waleed A. Abdulla. Stability charts for predicting sinkholes in weakly cemented sand over karst limestone [J]. Engineering Geology, 2002, 65(2): 179 - 184.
- [8] Li S C, Wu J, Xu Z H, et al. A possible prediction method to determine the top concealed karst cave based on displacement monitoring during tunnel construction[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2017: 1 - 15.
- [9] 包惠明, 胡长顺. 岩溶塌陷两级模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(3): 49 - 52.
- BAO Huiming, HU Changshun. Fuzzy comprehensive evaluation of two levels of karst collapse [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2001, 28(3): 49 - 52.
- [10] 罗周全, 徐海, 杨彪, 等. 矿区岩溶地表塌陷神经网络预测研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 21(9): 39 - 44.
- LUO Zhouquan, XU Hai, YANG Biao, et al. Prediction of karst collapse in mining area based on neural network [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 21(9): 39 - 44.
- [11] 孟庆山, 陈勇, 汪稔. 岩溶洞穴工程地质条件与顶板稳定性评价[J]. 土工基础, 2005, 18(5): 55 - 58.
- MENG Qingshan, CHEN Yong, WANG Nian. Evaluation on roof stability and engineering geology condition of karst cave[J]. Geotechnical Foundation, 2005, 18(5): 55 - 58.
- [12] 邱向荣. 岩溶塌陷稳定性的灰色模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 58 - 61.
- QIU Xiangrong. Grey fuzzy synthetic assessment for stability of karst collapse [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(4): 58 - 61.
- [13] 周志广, 姚文生, 谢轶, 等. 基于灰色理论的时间序列分析在地面沉降预测中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2012, 23(4): 52 - 57.
- ZHOU Zhiguang, YAO Wensheng, XIE Yi, et al. Time series analysis in ground subsidence prediction based on the grey theory[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2012, 23(4): 52 - 57.
- [14] 陈静, 马亚杰, 朱庆杰. 人工神经网络模型在岩溶塌陷安全评价中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(2): 139 - 142.
- CHEN Jing, MA Yajie, ZHU Qingjie. Application of artificial neural network model in karst collapse safety evaluation [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(2): 139 - 142.
- [15] 郑先昌, 卫中营. 武汉市岩溶地面塌陷诱发因素分析[J]. 城市勘测, 2004(1): 15 - 19.
- ZHEGN Xianchang, WEI Zhongying. Analysis on induced factors of Karst ground subsidence in Wuhan City [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2004(1): 15 - 19.
- [16] 冯永. 武汉市岩溶地面塌陷机制及危险性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
- FENG Yong. Study on Karst ground collapse mechanism and danger in Wuhan City [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009.
- [17] 钟宇, 张明堃, 潘玲, 等. 基于 GIS 的武汉市武昌区岩溶塌陷危险性评价[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2015(1): 48 - 53.
- ZHONG Yu, ZHANG Mingkun, PAN Ling, et al. Risk assessment of karst collapse in Wuchang district of Wuhan City based on GIS [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2015(1): 48 - 53.
- [18] 湖北省地质环境总站. 武汉市岩溶塌陷调查与监测项目成果报告[R]. 2015.
- Hubei Province Geological Environment Station. Report on the achievements of investigation and monitoring project of karst collapse in Wuhan City [R]. 2015.
- [19] 赵建军, 龚凌枫, 黄润秋. 数量化理论在工程地质领域中的应用综述[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1147 - 1153.
- ZHAO Jianjun, GONG Lingfeng, HUANG Runqiu. Application of quantification theory to engineering geology [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1147 - 1153.
- [20] 李军霞, 王常明, 王钢城, 等. 基于数量化理论Ⅲ的滑坡发育影响因素及耦合作用强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1206 - 1213.
- LI Junxia, WANG Changming, WANG Gangcheng, et al. Analysis of landslide influential factors and coupling intensity based on third theory of quantification [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1206 - 1213.