

鲁玉龙, 叶高峰, 杨仙, 等. 基于正态云模型的浏阳市永和镇岩溶塌陷易发性研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1294-1302.

DOI: 10.11932/karst2023y027

基于正态云模型的浏阳市永和镇岩溶塌陷易发性研究

鲁玉龙¹, 叶高峰¹, 杨仙², 卢治林¹, 刘洋¹, 张联志³, 李干龙³

(1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南益阳 413003; 3. 湖南省有色地质勘查局二总队, 湖南湘潭 411102)

摘要: 在对浏阳市永和镇既有岩溶塌陷进行详细勘查的基础上, 选取了岩溶发育程度(钻孔溶蚀率)、与区内断层的距离、上覆土层厚度、岩溶水特征、与人工抽水漏斗中心的距离以及地面塌陷现状(地面塌陷密度)等6个岩溶塌陷易发性评价因子, 提出了赋值条件及赋值范围, 并根据既有塌陷的评价因子评分状况, 采用熵值法获取了评价因子的权重, 基于正态云模型对研究区岩溶塌陷灾害的易发性进行了评价。正态云模型评价结果中既有岩溶塌陷均分布在岩溶塌陷高发区, 而层次分析法评价结果中3个既有塌陷分布在岩溶塌陷中易发区, 说明正态云模型在处理类似岩溶塌陷易发性评价等模糊性及随机性问题时比层次分析法更精准。

关键词: 岩溶; 地面塌陷; 评价因子; 正态云模型; 易发性

中图分类号: P642.26 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)06-1294-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶地面塌陷是岩溶区域常见的地质灾害, 对人民生命和财产危害大。对岩溶塌陷易发性进行分区评价, 有利于针对不同易发程度进行分类处置, 保证安全性和经济性。岩溶塌陷易发性常用的评价方法包括专家评议法、统计学法以及多元回归法等定性评价方法, 以及神经网络法、灰色系统理论、层次分析法、模糊综合评价法等定量、半定量评价方法^[1-5]。岩溶地面塌陷具有突发性、隐蔽性、多因素性、随机性以及模糊性等特点, 难以使用准确的数学方法进行完全定量表述^[6]。

正态云模型能很好地反映客观事物的模糊性和随机性, 并把二者完全集成在一起, 构成定性和定量相互间的映射^[7]。正态云模型最初多应用于

人工智能、多属性决策问题等方面^[8-9], 近年来也开始应用于边坡稳定性分析、岩爆易发性分析等问题中^[10-11], 但在岩溶地面塌陷易发性分析中的应用还很少。本文拟基于正态云模型, 对浏阳市永和镇岩溶塌陷易发性进行研究, 以为该区域分类处置塌陷提供依据, 也可为其他区域岩溶塌陷易发性评价提供参考。

1 研究区概况

1.1 基本地质情况

研究区位于浏阳市北东部, 距浏阳市直距 24 km, 行政区划位于湖南省浏阳市永和镇。该区出露地层自老至新有冷家溪群第二岩组第二段(Pt_{ln}^{2-2})、震旦系下统莲沱组(Z_1l)、震旦系下统南沱组(Z_1n)、震旦

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2021JJ40197)

第一作者简介: 鲁玉龙(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事地球化学及地质灾害方面的研究。E-mail: 316645465@qq.com。

通信作者: 杨仙(1982—), 女, 博士, 硕士生导师, 从事地下工程环境影响及地质灾害方面的研究。E-mail: yangxj@163.com。

收稿日期: 2022-08-08

系上统陡山沱组 (Z_2d)、寒武系 (C)、石炭系中上统壶天群 (C_{2+3ht})、二叠系下统栖霞组 (P_1q)、二叠系下统茅口组 (P_1m)、二叠系上统龙潭组 (P_2l)、长兴组 (P_2c)、第四系 (Q)。区内发育有轴向北北西小规模永和向斜, 向斜核部位于区内的中部, 岩性为二叠系长兴组 (P_2c), 两翼地层分别为二叠系上统龙潭组 (P_2l)、茅口组 (P_1m)、二叠系下统栖霞组 (P_1q), 两翼地层产状倾角较缓, 为 $10^\circ\sim 20^\circ$ 。区内主要发育有平移断层两条、逆断层六条、推测逆断层两条, 性质不明断层一条。区内地下水类型分为岩溶水、基岩风化裂隙水和松散岩类孔隙水三个大类。

1.2 岩溶塌陷概况

研究区内塌陷均发育于可溶岩层分布区。其中以二叠系下统栖霞组第二段 (P_1q^2) 质纯层厚碳酸盐岩分布区最发育; 其次分布于石炭系中上统壶天群 (C_{2+3ht}) 分布区。

在勘查区面积 14 km^2 的范围内, 到目前共发生岩溶塌陷 38 处, 对其中 22 处岩溶塌陷 (已填埋) 进行了访问调查, 对 16 处岩溶塌陷 (4 处已填埋) 进行实地详细勘查 (图 1)。塌陷点主要分布于断裂发育、地表水与地下水联系密切的可溶岩发育区域。地理位置主要分布在永和镇永福村月山组—欧家组—大和组、菊香社区—永和老街—沿溪镇花园村、佳成村南山组—李贞小学 (旧)—佳成村新湾组—佳成村新平组。

2 正态云模型简介

李德毅院士根据随机数学和模糊数学理论提出了正态云模型^[7]。云模型由期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 三个参数进行描述, 结合特定生成算法, 构造出服从泛正态分布的随机变量——云滴。期望 Ex 代表定性概念的基本确定性, 是云滴在论域空间分布的数学期望, 即最能代表定性概念的点。熵 En 代表定性概念的不确定性度量, 由概念的随机性和模糊性共同决定。超熵 He 度量熵的不确定性, 可以将定性概念的随机性约束弱化为“泛正态分布”, 反应定性概念对应的随机变量偏离正态分布的程度。

通过正态云发生器算法, 可输入三个参数和云滴数量 N , 输出 N 个云滴的定量值以及每个云滴代表概念的确定度。当样本的熵 En 增大时, 云滴分布范围变大。当样本的超熵 He 增大时, 云滴离散程度增大, 侧面反映云滴分布的随机性和模糊性。

3 研究区岩溶塌陷评价因子及赋值确定

通过对已有岩溶塌陷的现场调查, 考虑到岩溶塌陷各因素之间的相关性以及定量研究的便利性, 选取可量化的因素作为本研究区岩溶塌陷评价因子。

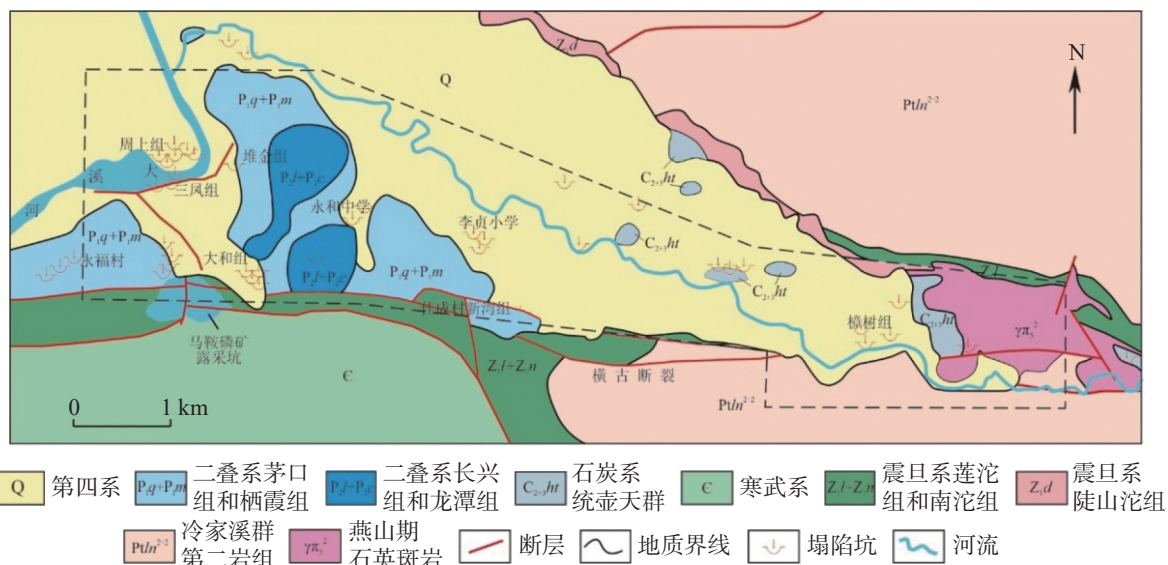


图 1 岩溶地面塌陷点分布图
Fig. 1 Distribution of karst ground collapse points

3.1 岩溶发育程度(钻孔溶蚀率)

浅部岩溶发育程度(钻孔溶蚀率)是产生塌陷的前提条件之一。根据物探解译及钻探资料及以往勘查资料,花园村、菊香社区、永福村、永和中学、佳成村等地附近岩溶最为发育,七宝山铁山村附近岩溶也较为发育。

3.2 与区内断层的距离

区内断裂构造发育,沿断裂带或断裂影响带岩溶发育,塌陷的空间分布受构造控制,主要沿F8、F9断层两侧集中分布,直线距离1.2 km范围内共有塌陷19处,占塌陷总数的50%,说明塌陷发生与断裂带发育相关性强。

3.3 上覆土层厚度

区内岩溶塌陷的发育与分布还与第四系土层厚度存在密切关系。在其它条件基本相似的前提下,当上覆第四系较薄(一般 <20 m),特别是上部表层粉(砂)质黏土较薄(一般 ≤ 3 m),岩溶塌陷易发生。当上覆第四系较厚(一般 ≥ 20 m),特别是上部表层粉(砂)质黏土较厚(一般 ≥ 3 m),岩溶塌陷一般相对不易发生或相对较弱。

3.4 地下水波动幅度

根据岩溶塌陷的发生机理,岩溶水在基岩面附近作承压一无压波动是引发塌陷的主要诱因。当波动范围为5~10 m时,最容易发生地面塌陷。据勘探资料,15个钻孔中13个钻孔水位位于基岩面之上,占86.7%,其余2个钻孔水位位于基岩面以下,占13.3%。钻孔施工及地下水位监测期间,各塌陷点附近未有大规模的抽水活动,因此,在本次评估中地下水波动主要受自然降雨等因素影响,与抽水活动关系不大。

3.5 与人工抽水漏斗中心的距离

区内岩溶地面塌陷与房屋开裂主要受周围矿山人抽排地下水影响。其中,2016年10月以前,附近磷矿开采标高已达 ± 0 m,低于地面约90 m,经计算其影响范围达2 km,主要影响花园村、菊香社区、永福村和永和中学附近,最远处已达人民路北侧。该区域共发现塌陷坑22处,占本次调查塌陷坑总数的57.9%。附近磷矿停产后,近两年新发生的地面塌陷与房屋开裂数量明显减少。

3.6 已有地面塌陷发育密度

已发生的38处塌陷具有很强的区域集中性,主要分布于花园村州上组、菊香社区、永和老街、月山组、欧家组和大和组一带,其次分布于石佳村、井泉村和铁山村附近,故将已有塌陷发育密度也作为一个评价因子。

根据区内实际情况,结合相关规范^[12]及文献^[13-16],确定评价因子赋值条件。参考相关文献^[17],首先把各参数最高及最低赋值定为9和1,最终计算得出的结果发现,有2个既有塌陷点划分到中风险区域。随后把最高及最低赋值调整到8和2后再次进行计算,结果全部既有塌陷点均能划分到高风险区域。因此,最终取值范围确定为8~2。评价因子及赋值见表1。当实际情况达到表1中的最大值时,取8,达到最小值时,取2,其余情况可通过内插法获得具体的数值。

4 基于正态云模型的岩溶塌陷易发性定量评价

4.1 评价因子权重确定

多因素综合评价问题中,各评价因子权重确定是一个关键性问题,其合理性直接影响并决定多因素评价的有效性。评价因子权重的确定方法有主观赋权法和客观赋权法。熵值法是一种常用的客观赋权方法,可根据各指标变异程度,计算出各指标权重,进行多指标综合评价,克服了主观赋权法受到个人知识或经验不足的影响而导致的主观片面性。熵权法在地面塌陷风险评价中已有应用案例^[18-19],部分文献^[20]对熵权法计算评价因子权重过程进行了详细叙述。

本文根据对既有塌陷坑的详细勘查成果,采用表1给出的评价因子及赋值,分别就6个评价因子给出16个塌陷坑的赋值(表2)。

根据既有塌陷坑的赋值矩阵,通过SPASSAU中提供的熵值法权重分析功能,得出各评价因子的权重,其中指标权重最大值为已有地面塌陷发育密度(0.228 83),最小值为地下水波动幅度(0.091 81),(表3)。

4.2 基于正态云模型的岩溶塌陷易发性定量评价

根据区内具体情况,结合对已发生塌陷区域的

表 1 评价因子及赋值表
Table 1 Table of evaluation factors and assignment

编号	评价因子名称	赋值条件	取值范围
1	钻孔溶蚀率/%	>10	8
		3~10	2~8
		<3	2
2	与区内断层距离/m	0~50	8
		50~100	2~8
		>100	2
3	上覆土层厚度/m	总厚≤10, 上部黏土≤3	8
		10<总厚≤20, 上部黏土≤3	2~8
		总厚>20, 上部黏土>3	2
4	地下水波动幅度/m·a ⁻¹	>8	8
		3~8	2~8
		<3	2
5	与抽水漏斗中心距离/m	0~200	8
		200~500	2~8
		>500	2
6	已有地面塌陷发育密度(个/10 km ²)	>10	8
		2~10	2~8
		<2	2

表 2 既有塌陷坑调查赋值
Table 2 Investigation and assignment of existing collapse pits

序号	钻孔溶蚀率	与区内断层距离	上覆土层厚度	地下水波动幅度	与抽水漏斗中心距离	已有地面塌陷发育密度
塌陷1	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
塌陷2	5.2	8.0	6.8	8.0	8.0	8.0
塌陷3	7.0	7.6	8.0	8.0	6.8	8.0
塌陷4	7.6	7.2	8.0	8.0	6.2	8.0
塌陷5	7.5	6.0	8.0	7.5	7.8	8.0
塌陷6	8.0	7.6	8.0	7.5	7.5	8.0
塌陷7	8.0	6.4	8.0	8.0	6.7	8.0
塌陷8	7.0	7.8	6.8	8.0	6.7	6.8
塌陷9	7.2	6.5	7.8	7.8	8.0	6.8
塌陷10	6.5	6.8	7.5	8.0	7.5	6.8
塌陷11	6.8	6.2	7.2	7.6	7.3	6.5
塌陷12	6.5	8.0	8.0	6.5	8.0	5.2
塌陷13	5.8	8.0	7.5	5.2	5.2	5.2
塌陷14	5.6	7.5	7.6	8.0	5.8	5.8
塌陷15	6.7	6.5	8.0	7.6	2.0	7.6
塌陷16	7.2	7.6	8.0	8.0	2.0	8.0

表 3 评价因子权重
Table 3 Evaluation factor weight

评价因子	钻孔溶蚀率	与区内断层距离	上覆土层厚度	地下水波动幅度	人工抽排地下水	已有地面塌陷发育密度
权重	0.179 93	0.124 26	0.199 72	0.091 81	0.175 45	0.228 83

反分析计算,确定正态云模型风险水平的评分标准如下:高易发区为 8.0~6.1,中易发区域为 6.0~3.6,低易发区为 3.5~2.0。

将研究区进行网格剖分,每个单元面积为 400 m×400 m,各单元面积内选取 4~6 个勘查点,根据正态云模型分析各单元面积的评价结果,当区域评价结

果的相似度低于 0.8,且云图中云滴离散时,认为勘查点数据离散性较大,评价结果可靠性较差,需进一步细分网格单元至 200 m×200 m 进行评价。本文以永和中学附近一单元面积为例,说明正态云模型对该单元面积岩溶塌陷易发性的评价过程。表 4 为该单元面积内 6 个勘查点的各评价指标的赋值结果。

表 4 单元点内勘查点评价因子赋值

Table 4 Evaluation factor assignment of exploration spots in unit points

序号	钻孔溶蚀率	与区内断层距离	上覆土层厚度	地下水波动幅度	人工抽排地下水	已有地面塌陷发育密度
勘查点1	7.6	8	7.6	6.2	7.2	7.0
勘查点2	7.6	8	5.4	6.2	7.2	7.0
勘查点3	7.6	8	7.2	6.2	6.8	7.0
勘查点4	7.6	7.2	7.2	5.2	6.8	7.0
勘查点5	7.0	7.2	8	5.2	5.6	7.0
勘查点6	7.0	6.8	8	5.2	5.6	7.0

确定评分标准的数字特征值为 $C_1(E_{xb}, E_{nb}, H_{eb}, He)$, 计算表达式为:

$$E_{xb} = \frac{C_{max} + C_{min}}{2} \quad (1)$$

$$E_{nb} = \frac{C_{max} - C_{min}}{6} \quad (2)$$

式中: E_{xb} 和 E_{nb} 分别为标准云的期望值和熵; C_{max} 和 C_{min} 分别为注释间隔的最大值和最小值; H_{eb} 是标准云的超熵,其值为常数,需要根据项目的实际情况和经验确定。

由式(1)和(2)可得岩溶评分标准的数字特征值为 $C_1(E_{xb}, E_{nb}, Heb)$, 结果见表 5。

表 5 岩溶塌陷评分标准正态云模型特征参数

Table 5 Characteristic parameters of scoring standard of normal cloud model for karst collapse

风险等级	高易发区	中易发区域	低易发区
数字特征	(7, 0.333, 0.1)	(4.8, 0.4, 0.1)	(2.8, 0.4, 0.1)

基于表 5 中的数据,利用 Matlab 编制正态云生成器程序,生成岩溶塌陷风险标准正态云(图 2),图

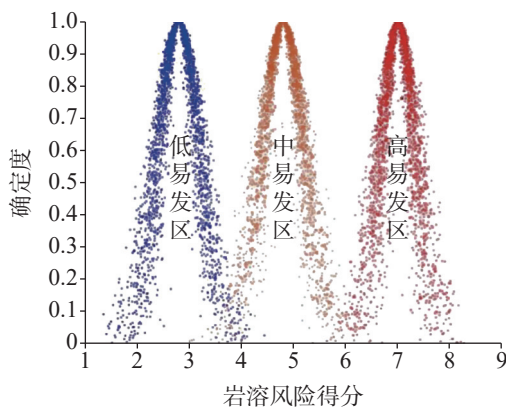


图 2 岩溶塌陷风险标准评价云

Fig. 2 Standard evaluation cloud for karst collapse

中从左至右依次为低易发区、中易发区、高易发区。

m 勘查点在 n 个评估指标上的得分矩阵 $Q(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im})$ 。由公式(3)、(4)、(5)和(6),计算 n 个评估指标云模型的数字特征 $C_i(E_{xi}, E_{ni}, He_i)$, 式中 $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

$$E_{xi} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m q_{ij} \quad (3)$$

$$E_{ni} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |q_{ij} - E_{xi}| \quad (4)$$

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (q_{ij} - E_{xi})^2 \quad (5)$$

$$He_i = \sqrt{|S_i^2 - E_{ni}^2|} \quad (6)$$

公式中: E_{xi} 、 E_{ni} 、 S_i^2 、 He_i 是样本的期望值、熵、方差和第 i 个样本的超熵指数; q_{ij} 是第 j 个勘查点在第

i 个评估指标上的得分。

结合熵权法计算出来的各评价指标的权重和各指标评价云的数字特征,可以根据公式(7)、(8)、(9)得到岩溶塌陷综合评价云的数字特征 $C_2(E_x, E_n, He)$ 。

$$E_x = \sum_{i=1}^n (E_{xi}w_i) \quad (7)$$

$$E_n = \sum_{i=1}^n (E_{ni}w_i) \quad (8)$$

$$He = \sum_{i=1}^n (He_iw_i) \quad (9)$$

由公式(3)~(9)结合表 4 得岩溶塌陷综合风险评估云的数字特征(表 6)。使用 MATLAB 软件进行计算,得出岩溶塌陷综合风险评估云(图 3)。

表 6 岩溶塌陷综合风险评估云的数字特征

Table 6 Digital characteristics of comprehensive risk evaluation cloud for karst collapse

项目总指标	E_x	E_n	He
岩溶塌陷综合评价云C	6.983 6	0.485 700 031	0.231 6

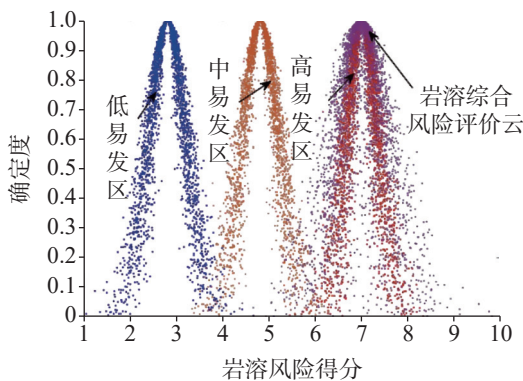


图 3 岩溶塌陷综合风险评估云

Fig. 3 Comprehensive risk evaluation cloud for karst collapse

由图 3 可知,岩溶塌陷综合风险评估云与高易发风险标准云接近,由此可以初步判断永和中学附近单元面积区域为发生岩溶塌陷的高易发区,需通过相似度计算进一步验证。

确定岩溶评分标准评价云和岩溶塌陷综合风险评估云的数字特征如下:分别是 $C_1(E_{xb}, E_{nb}, Heb)$ 和 $C_2(E_x, E_n, He)$ 。在获得岩溶塌陷综合风险评估云的数字特征后,计算其与标准正态云之间的相似度 Δi , 然后对计算结果进行排序,确定岩溶塌陷综合风险评估等级。

(1)生成一个正态随机数 $E_n = Norm(E_{nb}, Heb)$, 随机数的期望值为 E_{nb} , 标准差为 Heb ;

(2)生成一个正常的随机数 $x_i = (E_{nb}, E_n)$, 期望值

为 E_{nb} , 标准差为 E_n ;

(3)计算隶属度 μ_i ;

$$\mu_i = \exp\left[-\frac{(x-E_{xp})^2}{2(E_{np})^2}\right] \quad (10)$$

(4)回至步骤(1)直至生成 n 个 μ_i , 计算相似度 Δi ;

$$\Delta i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (11)$$

根据公式(10)、(11)计算岩溶塌陷综合风险评估云和岩溶评分标准评价云的相似度,计算结果见表 7。

表 7 岩溶塌陷综合风险评估云相似度

Table 7 Cloud similarity of comprehensive risk evaluation for karst collapse

相似度	高易发区	中易发区域	低易发区	评估结果
岩溶塌陷综合风险评估云C	0.804 4	0.010 1	0	高易发区

由表 7 可知,永和中学附近单元面积区域为发生岩溶塌陷的高易发区,需注意防范风险。按同样的方式对所有单元网格进行评价,即可得到全区易发性分区情况。

4.3 易发性分区图

根据正态云模型评价结果,利用 MAPGIS 进行综合分析处理,得出易发性分区图(图 4)。结合易发性分区图,得到地面塌陷地质灾害易发性分区一览表(表 8)。

由评价结果可知,已发生岩溶塌陷点分布在岩溶塌陷的高易发区,说明本次评价分区具有合理性。

4.4 与层次分析法评价结果对比

层次分析法是岩溶塌陷易发性评价中常用的方法之一。本研究选取同样的评价因子(文中第 3 节所述的 6 项评价因子),采用层次分析法进行该区域岩溶塌陷易发性评价。

基于专家打分确定评价因子取值,再通过层次分析法(1-9 标度法)判断评价因子的影响权重,并进行一致性检验,最后通过 GIS 得出风险分区图。

通过对正态云模型及层次分析法评价结果进行对比分析表明:层次分析法划分出的高易发区面积较正态云方法得出的高 10.8%,且有 3 个既有塌陷坑分布在岩溶塌陷中易发区。说明正态云模型在处理模糊性及随机性问题时比层次分析法更精准。

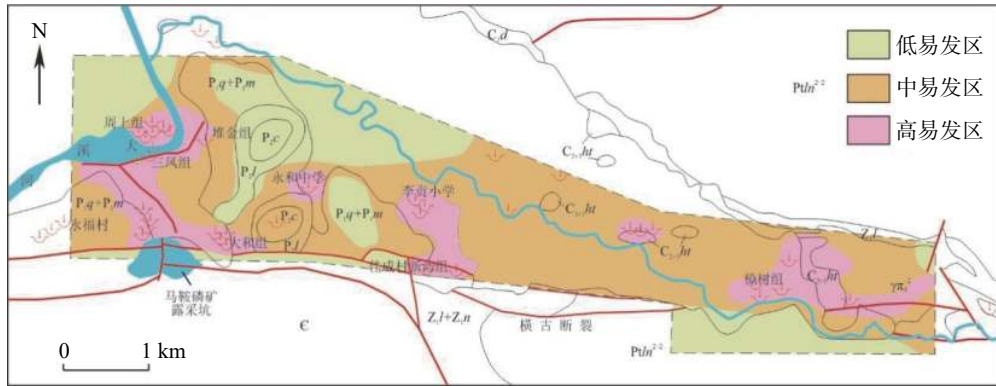


图 4 永和镇岩溶塌陷风险易发性分区图

Fig. 4 Zoning map of karst collapse susceptibility in Yonghe town

表 8 地面塌陷易发性分区一览表

Table 8 Zoning of ground collapse susceptibility

灾种	综合分区	面积/km ²	分布区域
地面塌陷	高易发区	1.56	花园村—菊香社区—永福村一带
		0.15	永和中学—佳成村南山组一带
	0.58	李贞小学(旧)—佳成村新湾组—佳成村新平组一带	
	0.12	井泉村牛车组一带	
	0.93	铁山村—宝山村一带	
	中等易发区	9.18	花园村—菊香社区—佳成村—宝山河沿岸一带
	低易发区	5.91	危险性大区、中等区之外

5 结 论

(1) 本文选取了岩溶发育程度(钻孔溶蚀率)、与区内断层的距离、上覆土层厚度、岩溶水特征、与抽水漏斗中心距离以及地面塌陷现状(地面塌陷密度)等 6 个岩溶塌陷易发性评价指标,对浏阳市永和镇岩溶地面塌陷易发性进行评价。

(2) 基于熵权法,对 16 个既有塌陷坑 6 个评价指标的权重进行了计算,结果表明,已有地面塌陷发育密度权重最大,地下水波动幅度权重最小。

(3) 应用正态云模型,结合各评价指标权重,对研究区内各单元面积区域岩溶塌陷易发性进行评价,已发生岩溶塌陷点均分布在岩溶塌陷的高易发区。

(4) 正态云模型及层次分析法对岩溶塌陷易发性评价表明,正态云模型在处理类似于岩溶塌陷风险划分等模糊性及随机性问题时比层次分析法更具优势。

(5) 采用正态云模型进行岩溶地面塌陷易发性评价时,可通过岩溶塌陷综合风险评价云相似度来控制网格单元面积大小。相似度较高,且云滴离散

性小的区域,可适当增加每次评价的单元面积,以减少评价工作量。

参考文献

[1] 项式均,陈健,覃有强. 湖北大冶县大广山铁矿岩溶塌陷的预测和评价[J]. 中国岩溶, 1987, 6(4): 297-314.
XIANG Shijun, CHEN Jian, QIN Youqiang. Prediction and evaluation of karst collapse in Daguangshan iron mine in Daye county, Hubei[J]. Carsologica Sinica, 1987, 6(4): 297-314.

[2] 贾秀梅,周骏业,董玉良,张发旺. 灰色系统理论在岩溶地面塌陷分析预测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(Suppl.1): 113-117.
JIA Xiumei, ZHOU Junye, DONG Yuliang, ZHANG Fawang. Application of the grey system model in the prediction of karst ground collapse[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, 5(Suppl.1): 113-117.

[3] 包惠明,胡长顺. 岩溶地面塌陷神经网络预测[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 299-304.
BAO Huiming, HU Changshun. Neural network prediction of karstic ground collapse[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(3): 299-304.

[4] 陈菊艳,朱斌,彭三曦,单慧媚. 基于AHP和GIS的矿区岩溶塌陷易发性评估:以贵州林歹岩溶矿区为例[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(5): 226-236.

- CHEN Juyan, ZHU Bin, PENG Sanxi, SHAN Huimei. Assessment of susceptibility to karst collapse in mining area based on AHP and GIS: A case study in Lindai karst mining area in Guizhou[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(5): 226-236.
- [5] 武鑫, 黄敬军, 缪世贤. 基于层次分析-模糊综合评价法的徐州市岩溶塌陷易发性评价[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(6): 836-841.
- WU Xin, HUANG Jingjun, MIAO Shixian. Susceptibility zoning and mapping of karst collapse in Xuzhou using analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 836-841.
- [6] 蒙彦, 雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(3): 411-417.
- MENG Yan, LEI Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(3): 411-417.
- [7] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. *中国工程科学*, 2004, 6(8): 28-34.
- LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. *Engineering Science*, 2004, 6(8): 28-34.
- [8] 龚艳冰, 巢妍. 基于不确定正态云组合权重的综合评价方法研究[J]. *统计与信息论坛*, 2020, 35(5): 3-8.
- GONG Yanbing, CHAO Yan. Research on comprehensive evaluation method based on uncertain normal cloud combination weight[J]. *Statistics & Information Forum*, 2020, 35(5): 3-8.
- [9] 付学文. 基于云模型的遗传算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- FU Xuewen. Research on genetic algorithm based on cloud model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [10] 袁爱平. 基于层次分析法-正态云模型的岩质边坡稳定性预测[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(9): 153-156.
- YUAN Aiping. Stability evaluation of rocky slope based on AHP-normal cloud model[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(9): 153-156.
- [11] 李明亮, 李克钢, 刘月东, 吴顺川, 秦庆词, 王航龙. 基于变异系数与序关分析法-多维正态云模型的岩爆预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(Suppl.2): 3395-3402.
- LI Mingliang, LI Kegang, LIU Yuedong, WU Shunchuan, QIN Qingci, WANG Hanglong. Rock burst prediction based on coefficient of variation and sequence analysis-multidimensional normal cloud model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(Suppl.2): 3395-3402.
- [12] 中国地质灾害防治工程行业协会. 岩溶地面塌陷防治工程勘查规范(试行)T/CAGHP076-2020[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2020.
- China Association of Geological Hazard Prevention. Code for engineering investigation of karst ground collapse prevention (Trial) T/CAGHP076-2020[S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2020.
- [13] 李文博, 张洪岩, 彭超. 基于AHP-FCE模型的岩溶地面塌陷灾害易发程度分区评价[J]. *中国矿业*, 2021, 30(6): 195-199.
- LI Wenbo, ZHANG Hongyan, PENG Chao. Evaluation of the susceptibility of karst ground collapse disaster based on AHP-FCE model[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(6): 195-199.
- [14] 刘秀敏, 陈从新, 沈强, 陈建胜. 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, CHEN Jiansheng. Spatial prediction and evaluation of collapse of covered karst[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(9): 2785-2790.
- [15] 姜伏伟, 张发旺, 柳林, 刘伟, 李亮, 陈航. 南宁地铁施工降水诱发岩溶塌陷条件及安全防控措施[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(3): 415-420.
- JIANG Fuwei, ZHANG Fawang, LIU Lin, LIU Wei, LI Liang, CHEN Hang. Dewatering induced karst collapse conditions and safety prevention and control measures in Nanning subway construction[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(3): 415-420.
- [16] Taheri K, Gutierrez F, Mohseni H, Raeisi E, Taheri M. Sinkhole susceptibility mapping using the Analytical Hierarchy Process (AHP) and magnitude-frequency relationships: A case study in Hamadan Province, Iran[J]. *Geomorphology*, 2015, 234: 64-79.
- [17] 吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 雷明堂, 戴建玲, 罗伟权, 潘宗源. 基于AHP和GIS技术的湖南怀化地区岩溶塌陷易发性评价[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(1): 21-33.
- WU Yuanbin, LIU Zhikui, YIN Renchao, LEI Mingtang, DAI Jianling, LUO Wei-quan, PAN Zongyuan. Evaluation of karst collapse susceptibility in Huaihua area, Hunan Province based on AHP and GIS[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 21-33.
- [18] 阮永芬, 张虔, 闫明, 郭宇航, 蔡龙. 基于AHP-信息熵-模糊集的岩溶塌陷风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(6): 2986-2993.
- RUAN Yongfen, ZHANG Qian, YAN Ming, GUO Yuhang, CAI Long. Karst collapse risk assessment based on AHP-EWM-FT[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(6): 2986-2993.
- [19] 陈学军, 陈李洁, 宋宇, 毕鹏雁. 熵权-正态云模型岩溶塌陷预测分析[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1389-1394.
- CHEN Xuejun, CHEN Lijie, SONG Yu, BI Pengyan. Prediction and analysis of karst collapse with entropy-normal cloud model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1389-1394.
- [20] 杨仙, 张可能, 岳健, 黄常波. 基于熵量法的盾构施工过程风险评价[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(4): 64-68.
- YANG Xian, ZHANG Keneng, YUE Jian, HUANG Changbo. Risk assessment in shield construction based on entropy theory[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 30(4): 64-68.

Study on susceptibility of karst collapse based on normal cloud model in Yonghe town, Liuyang City

LU Yulong¹, YE Gaofeng¹, YANG Xian², LU Zhilin¹, LIU Yang¹, ZHANG Lianzhi³, LI Ganlong³

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 4130003, China; 3. The Second Team of Hunan Bureau of

Nonferrous Geological Prospecting, Xiangtan, Hunan 411102, China)

Abstract Ground collapse is a common geological disaster in karst area, which would bring great harm to people's life and property. The zoning evaluation on karst collapse susceptibility is beneficial to the classification and treatment of the disaster in order to ensure safety and economy. Karst ground collapse is characterized by suddenness, concealment, multi-factor, randomness and fuzziness; therefore, it is difficult to be fully quantified. The normal cloud model could effectively reflect the fuzziness and randomness of objective things, and integrate them to form the mapping between qualitative and quantitative analyses. In this paper, based on the normal cloud model, the study on susceptibility of karst collapse in Yonghe town, Liuyang City has been conducted in order to provide a basis for the classification and treatment of ground collapse in this area, and also provide a reference for the susceptibility evaluation of karst collapse in other areas.

The study area is located to the northeast of Liuyang City, 24 km away from it, and its administrative division is located in Yonghe town, Liuyang City, Hunan Province. Ground collapses in this area are all developed in the distribution area of soluble rock layer. The most developed layer is the second member of the Lower Permian Qixia Formation (P_1q^2) with thick-layered carbonate rocks. Secondly, ground collapses are distributed in the middle and upper Carboniferous Hutian Group ($C_{2+3}ht$). The study area covers an area of 14 km², and 38 karst collapses have occurred in this area so far. Among these collapses, 22 have been surveyed and filled. Sixteen collapses, four of which have been filled, have been investigated in detail. The collapse sites are mainly distributed in the region of soluble rock where faults are developed and surface water and groundwater are closely connected. Geographically, the collapse sites are mainly distributed in Yueshan Formation-Oujia Formation-Dahe Formation, Yongfu village, Yonghe town, Juxiang community-the old street of Yonghe-Huayuan village, Yanxi town, Nanshan Formation-Lizhen Primary School (old)-Xinwan Formation-Xinping Formation.

Six evaluation indexes of karst collapse susceptibility were selected in this study, including karst development degree (dissolution rate of borehole), distance from the fault in the area, thickness of overlying soil layer, characteristics of karst water, distance from the pumping funnel center and current situation of ground collapse (ground collapse density). Firstly, according to the detailed exploration results of existing subsidence pits, the weights of six evaluation indicators of 16 existing subsidence pits were calculated and assigned based on entropy weight method. The calculation results indicate that the weight of development density of existing ground collapses is the largest, and that of the fluctuation amplitude of groundwater is the smallest. Secondly, the scoring standard for the risk level of normal cloud model was determined, and the susceptibility of karst collapse in each unit area in the study area was evaluated combined with the weight of each evaluation index. The evaluation results show that all the karst collapses that occurred are distributed in the area highly subject to karst collapse, indicating that the zoning in the evaluation of this study is reasonable.

When the normal cloud model is used to evaluate the susceptibility of karst collapse, the size of grid cells could be controlled by the cloud similarity of comprehensive risk evaluation of karst collapse. For areas with high similarity and small cloud droplet dispersion, the unit area of each evaluation could be appropriately increased in order to reduce the evaluation workload. In addition, the high risk area calculated by analytic hierarchy process is 10.8% larger than that by normal cloud method, but three existing collapse pits distributed in the area at medium-level risk of karst collapse, indicating that normal cloud model takes more advantages than analytic hierarchy process in dealing with fuzzy and random problems such as the risk evaluation of karst collapse.

Key words karst, surface collapse, evaluation factors, normal cloud model, susceptibility

(编辑 张玲)