

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.03.15

基于证据权法的公路路基岩溶塌陷危险性评价

孙琳,任娜娜,李云安,胡乐健

(中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 将证据权模型应用在公路路基岩溶发育强度分区中,在工程作用下岩溶强发育区易发生岩溶塌陷。介绍了证据权模型的方法。在丹霞枢纽互通区域,应用 ArcGIS 将研究区划分为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的栅格,考虑地层岩性、地下水距地面距离、顶板厚度、距断层距离 4 个证据因子,然后进行证据因子优选,通过叠加分析,得出岩溶发育强度的后验概率,并进行条件独立性检验,利用 CAPP 曲线确定阈值将后验概率分区。应用 ROC 曲线进行预测的精度评价,预测正确概率为 66.2%。最后结果表明,证据权模型应用在公路路基岩溶方面可行。

关键词: 证据权模型;GIS;公路路基岩溶;精度评价;危险分区

中图分类号: P642.25;P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)03-0094-07

Risk assessment on karst collapse of the highway subgrade based on weights of evidence method

SUN Lin, REN Na'na, LI Yun'an, HU Lejian

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

Abstract: The weights of evidence model is applied to the subdivision of highway subgrade which the karst is strongly developed. Karst collapse is easy to occur in areas with active engineering activities and strong karst development. Weights of evidence method is introduced. In the interchange area of Danxia Hub, ArcGIS is used to divide the study area into a grid of $5\text{ m} \times 5\text{ m}$. Including of the lithology, the distance from groundwater to the ground, the thickness of the roof, and the distance from the fault, four evidential factors are selected and then optimized. Through the overlay analysis, the posterior probability of karst-development intensity was obtained, and the conditional independence test was performed. The CAPP (Cumulative Area-Posterior Probability) curve was used to determine the threshold to partition the posterior probability. The ROC (Receiver Operating Characteristic) curve was used to estimate the accuracy of the prediction. The correct probability of prediction was 66.2%. The final result shows that the weights of evidence model is feasible in the application of karst in highway subgrade.

Keywords: weights of evidence model; GIS; highway subgrade karst; accuracy evaluation; dangerous partition

0 引言

岩溶即喀斯特(KARST)。地下水和地表水对可

溶性岩石的破坏和改造作用,这种作用及其所产生的地貌现象和水文地质现象总称为岩溶^[1]。岩溶本身是一种常见的地质现象,但是随着我国经济的发展,基

收稿日期: 2018-10-31; 修订日期: 2018-12-13

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFC0809400)“极端条件下的大区域电网设施安全保障技术”;国家自然科学基金-广东联合基金重点项目(U1711266)

第一作者: 孙琳(1994-),男,河北秦皇岛人,在读硕士,主要研究方向为地质灾害、地基与基础工程。E-mail:1908630531@qq.com

通讯作者: 李云安(1965-),男,湖北安陆人,博士研究生,教授,主要从事岩土工程、地质工程方面研究。E-mail:847748548@qq.com

础工程的建设,岩溶塌陷已经成为我国主要地质灾害之一。据记载,人类活动造成的岩溶塌陷存在着逐年递增的趋势。在岩溶地区,岩溶塌陷不明显,但在人类工程的影响下,存在岩溶塌陷的可能性;因此进行岩溶发育强弱预测、并对重点区域进行岩溶塌陷的排查具有重要的现实意义。

地质灾害预测是地质灾害评估中重要的一环,一直广受关注。国内学者对岩溶塌陷不确定性预测也开始了一些研究。雷明堂等^[2]率先将 GIS 技术应用在岩溶塌陷不确定性评价中。随后一些知识驱动模型应用在岩溶塌陷预测中,其中权重的定量化取值最终依靠的是专家的理论 and 经验。主要方法有层次分析法(AHP)^[3-5]、模糊层次分析法^[6]、模糊综合评判法^[7-8]、灰色聚类法^[9]等。但是基于知识驱动模型受人为主观性影响较大,不同情况下必将损失掉空间数据本身深层的信息。不同学者又将数据驱动模型运用到岩溶塌陷预测当中,其中通过计算来确定各影响因素的权重。数据驱动模型主要包括人工神经网络(ANN)^[10]、逻辑回归^[11]、证据权法^[12]等。这些模型预测方法在滑坡、泥石流灾害区划预测中已经进行大量的应用。但是这些模型在岩溶塌陷区划中只有少量的应用,基本呈现出单点开花,个别学者应用的现象,尤其是数据驱动模型迄今为止只有个别学者研究使用过,不具备说服力。因此,运用证据权模型对岩溶路基发育强弱进行预测,依托 GIS 技术并且有着深厚的统计学理论基础,这将为岩溶研究者提供一个更科学、直观的研究背景。

本文选取丹霞互通枢纽岩溶区域,通过计算岩溶发育的先验概率,客观解释了各影响因素与岩溶的关系,选取条件独立的证据,利用证据权模型结合 GIS 技术确定岩溶发育强弱的后验概率,从而得出在丹霞互通枢纽建设影响下岩溶塌陷易发分区。最后进行预测概率的 ROC 精度评价分析。

1 方法介绍

证据权法(the weight of evidence, wofe)是基于贝叶斯准则的一种离散的多元统计方法。基于贝叶斯准则计算出各证据层因子的权重,有效避免了人的主观性。证据权法最开始应用于医学领域,在 20 世纪 80 年代 BONHAM-CARTER^[13]和 AGTERBERG 等人^[14]将证据权法应用于地质矿产领域,现已基本成熟。随后又有学者将其应用于滑坡、泥石流等地质灾害领域。证据权首先进行先验概率的计算,就是用已发现的岩

溶点进行计算;然后进行各个证据因子权重的计算;之后还要进行证据因子的优选;最后运用 GIS 将各权重因子叠加得出岩溶发育的后验概率图并进行证据因子独立性检验。

证据权模型原理如下。假设研究区域栅格数为 $N[T]$, 且每个栅格最多只有一个岩溶点,岩溶点的单元数为 $N[K]$, 所以任意单元发生岩溶的先验概率公式为:

$$P_{prior} = P\{K\} = \frac{N[K]}{N[T]} \quad (1)$$

再假设多个(j)证据层为 $\{B_j\}$, 证据存在和不存在的栅格数为 $N[B_j]$ 和 $N[\bar{B}_j]$, 对应的正负权重为 W_j^+ 和 W_j^- 计算公式如下所示:

$$W_j^+ = \ln \frac{P\{B_j | K\}}{P\{B_j | \bar{K}\}} = \ln \frac{N\{B_j \cap K\} / N[K]}{N\{B_j \cap \bar{K}\} / N[\bar{K}]} \quad (2)$$

$$W_j^- = \ln \frac{P\{\bar{B}_j | K\}}{P\{\bar{B}_j | \bar{K}\}} = \ln \frac{N\{\bar{B}_j \cap K\} / N[K]}{N\{\bar{B}_j \cap \bar{K}\} / N[\bar{K}]} \quad (3)$$

式中: $N[\bar{K}]$ ——不存在岩溶的栅格数;

$N\{B_j \cap K\}$ ——既包括证据层 B_j 又有岩溶的栅格数,由此可知 $N\{B_j \cap \bar{K}\}$ 、 $N\{\bar{B}_j \cap K\}$ 和 $N\{\bar{B}_j \cap \bar{K}\}$ 。

当 $W_j^+ > 0$, 而 $W_j^- < 0$, 表示该证据有利于岩溶形成;反之,不利于岩溶形成,因此这时该证据与岩溶形成无关。且 W_j 与证据层关系如下所示:

$$\begin{cases} W_j^+ & \text{证据层存在} \\ W_j^- & \text{证据层不存在} \\ 0 & \text{缺少数据} \end{cases} \quad (4)$$

证据因子优选,在计算每个证据层的权重后,需要将证据层二值化处理。但是一个证据层可能存在多级、多个权重,就需要确定最优切值(cut of fvaule)。最优切值可以通过对比值 C (contrast) 来确定。 $C = W_j^+ - W_j^-$ 表示一组空间证据与一组预测目标之间的空间关联度量。 C 值大于 0 为正相关,且 C 值越大,关联越大;反之亦然。但是,在一些特定情况下,训练点较少,没有明确的最大 C 值,可以采用学生化检验^[15]。学生化检验(the studentized C) $\text{stud}(C)$ 是一种显著性检验。

$$\text{stud}(C) = \frac{C}{\sqrt{s^2(W_j^+) + s^2(W_j^-)}} \quad (5)$$

式中: $s^2(W_j^+)$ 和 $s^2(W_j^-)$ 表示为 W_j^+ 和 W_j^- 的方差。

计算方式如下:

$$s^2(W_j^+) = \frac{1}{N\{B_j \cap K\}} + \frac{1}{N\{\bar{B}_j \cap \bar{K}\}} \quad (6)$$

$$s^2(W_j^-) = \frac{1}{N\{B_j \cap K\}} + \frac{1}{N\{B_j \cap \bar{K}\}} \quad (7)$$

在显著性检验之后,取显著性水平 $\alpha = 0.05$, $\text{stud}(C) > 1.96$,认为 95% 与目标预测相关,表明优于其他切值。当存在多个 $\text{stud}(C)$ 大于 1.96,可选取 $N\{B_j \cap K\}$ 最大者^[12]。

最后可计算后验概率。为了计算简便,引入定义的几率 $O\{K\}$,其计算如下:

$$O\{K\} = \frac{P\{K\}}{1 - P\{K\}} = \frac{N\{K\}/N\{T\}}{1 - N\{K\}/N\{T\}} \quad (8)$$

经过推导,可以得出:

$$\ln O(K | B_1^m B_2^m \cdots B_j^m) = \sum_{j=0}^n W_j^m + \ln O\{K\} \quad (9)$$

式中:有 j 个证据层,其中 m 表示证据的存在状态,证据存在 m 计算的 W_j^m 就为 W_j^+ ,反之就是 W_j^- 。可以推出后验概率计算公式为:

$$P(K | B_1^m B_2^m \cdots B_j^m) = \frac{O(K | B_1^m B_2^m \cdots B_j^m)}{1 + O(K | B_1^m B_2^m \cdots B_j^m)} \quad (10)$$

2 工程实例

本文利用 ArcGIS Desktop 10.2 软件等功能和 Excel 2013,成功地对应位于广东省韶关市仁化县丹霞枢纽互通区域进行了公路路基岩溶发育的后验概率计算,并给出岩溶发育分区图和预测精度评价。

2.1 研究区概况

拟建丹霞枢纽互通位于广东省韶关市仁化县,路线经打铁冲村与新建村。互通区设置有 A、B、C、D、E、F、G、H 共 8 个匝道,总计长度为 6 258.7 m(本文只选取其中交汇的最主要一部分)。互通区以桥梁及路基形式通过,线路上部为冲洪积平原,地形平缓,地势相对平坦,以水田、鱼塘为主,有一条水沟穿过;丘陵低山,山体高大、山坡较陡,植被发育,场区有粤赣高速、水泥路及在建的韶赣铁路与外界相通,交通条件较好。场区地貌上属于低山丘陵单元区(图 1)。

2.2 证据因子分析

2.2.1 证据因子数据准备

岩溶是一种常见的地质灾害,影响岩溶发育有三大基本条件,分别是:可溶性岩石、具有溶蚀能力的水、良好的水循环交替条件^[1]。本论文图层有研究区岩溶点 ArcGIS 点文件(钻孔数据提取)、地层岩性图层、地下水距地面距离分区图(钻孔数据提取)、岩溶顶板厚度分区图层(钻孔数据提取)、断层多级缓冲区图

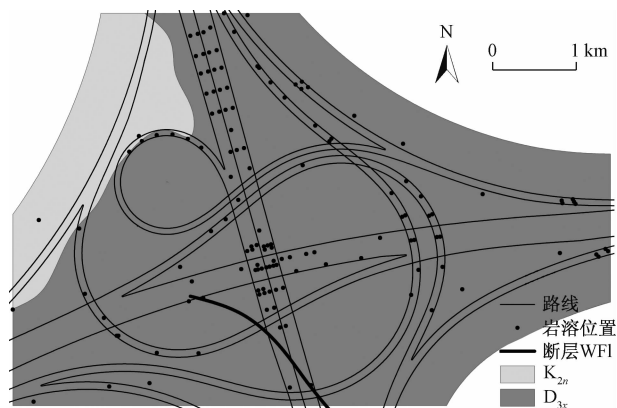


图 1 研究区范围及其概况

Fig. 1 The overview of the research area

层。本文研究的是互通公路路基岩溶,周围对路基影响不大,选取互通区域公路外 55 m 作为研究区域,并且被划分成 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的栅格单元($N[T] = 10\,487$),能够保证一个栅格单元只有一个岩溶点。研究区共有 157 个钻孔数据有岩溶,即 $N[K] = 157$ 。则通过计算岩溶发育的先验概率为: $P_{\text{prior}} = \frac{157}{10\,487} = 0.015\,0$ 。

2.2.2 地层岩性

基于研究区的地层地质图和钻孔数据,且岩溶发育在可溶性岩石中,所以地层图中忽略第四系粉质黏土。地层分别是上白垩统南雄组(K_{2n})含砾砂岩和泥盆系上统锡矿山组(D_{3x})角砾状灰岩。表 1 中是通过计算确定证据因子和岩溶的关系,其中锡矿山组角砾状灰岩地层的 $\text{stud}(C) > 1.96$,可将该地层作为本证据图层的二值化处理切值。

表 1 地层岩性权重及对比度

Table 1 Weights and contrast of lithology

地层岩性	W^+	W^-	$\text{Stud}(C)$
K_{2n}	-1.326 1	0.095 4	-3.120 5
D_{3x}	0.095 4	-1.326 1	3.120 5

2.2.3 地下水

岩溶发育的一大基本条件就是可溶性水。本文根据原始数据计算出地下水位距离地面的距离,并做出地下水距地面距离分区图。根据实际情况,地下水距地面最小为 1.25 m,最大为 18.75 m。地下水距地面距离均匀划分,可将地下水距地面的距离分为 5 个区域,分别是 1.25 ~ 4.75 m、4.75 ~ 8.25 m、8.25 ~ 11.75 m、11.75 ~ 15.25 m、15.25 ~ 18.75 m。由表 2 可知,区域 1.25 ~ 4.75 m 可作为本证据图层的最优切值。且该条件符合理论经验认知,地下水水位高的地

方岩溶发育强烈。

表 2 地下水距地面距离权重及对比度

Table 2 Weights and contrast of the distance from ground water to ground surface

地下水位线/m	W^+	W^-	Stud(C)
1.25 ~ 4.75	0.113 4	-0.349 7	2.323 6
4.75 ~ 8.25	-0.003 1	0.000 7	-0.018 3
8.25 ~ 11.75	-2.559 9	0.079 6	-2.629 3
11.75 ~ 15.25	-1.022 9	0.011 5	-1.028 3
15.25 ~ 18.75	0.523 0	-0.002 6	0.517 4

2.2.4 顶板厚度

顶板厚度是岩溶发育顶部距岩层顶面的距离。顶板厚度能够表明岩溶在可溶性岩层中发育的位置。顶板厚度对岩溶发育有一定的影响,其中顶板越厚,水循环越差,岩溶可能就不发育。根据实际情况,将顶板厚度分为 6 个区域,分别是:0 ~ 3 m、3 ~ 6 m、6 ~ 9 m、9 ~ 12 m、12 ~ 18 m、18 ~ 35 m。由表 3 可知,证据优选后,区域 0 ~ 3 m 可作为本证据图层的最优切值。并且符合理论经验认知,在岩层分界面,岩溶发育强烈。

表 3 顶板厚度权重及对比度

Table 3 Weights and contrast of the roof thickness

顶板厚度/m	W^+	W^-	Stud(C)
0 ~ 3	0.335 4	-0.265 2	3.730 2
3 ~ 6	-0.131 3	0.047 5	-0.961 0
6 ~ 9	-0.017 4	0.002 7	-0.085 3
9 ~ 12	-0.614 7	0.034 3	-1.552 6
12 ~ 18	-1.268 8	0.087 8	-2.977 8
18 ~ 35	0.136 5	-0.004 2	0.306 9

2.2.5 断层

断层可以影响地下水流向,对岩溶发育有一定的影响。在研究区有一条断层破碎带 WF1,物探成果发现成带状分布,向下延伸深度大,近北东走向,视宽度约 25 m,影响宽度约 60 m,构造垂向延伸深度较大,构造水平展布长度较大。根据距断层距离分区,分别是:0 ~ 100 m、100 ~ 200 m、200 ~ 300 m、300 ~ 400 m、<200 m、<300 m。由表 4 可知,证据优选后,区域 0 ~ 100 m 可作为本证据图层的最优切值。

2.2.6 证据因子优选

每个证据因子几乎都有多级分区。这就需要每个证据图层进行二值化处理。二值化处理之前按照方法确定最优切值。经计算(表 1 ~ 表 4),选取的最优切值为:地层岩性中灰岩(D_{3x})、地下水距地面距离 1.25 ~ 4.75 m、顶板厚度 0 ~ 3 m、距断层距离 <100 m。

表 4 断层缓冲区权重及对比度

Table 4 Weights and contrast of the fault buffer zone

断层距离/m	W^+	W^-	Stud(C)
0 ~ 100	0.444 5	-0.172 4	3.635 6
100 ~ 200	-0.553 9	0.183 5	-3.566 7
200 ~ 300	0.127 8	-0.057 7	1.085 0
300 ~ 400	-0.099 5	0.017 2	-0.504 2
<200	-0.024 8	0.028 5	-0.330 8
<300	0.031 3	-0.173 1	0.882 9

2.3 条件独立性检验和后验概率

2.3.1 条件独立性检验

证据权法是基于贝叶斯准则的一种方法,所以要使后验概率正确,必须满足条件独立性。条件独立性检验方法有卡方检验(χ^2)^[16],本文采用的是 Bonham-Cater 提出的一种 omnibus test 方法^[12]。采用已知岩溶点的数量 $N[K]$ 与预测出岩溶点的数量 $N[K]_p$ 之比作为判断标准,即 $\frac{N[K]}{N[K]_p} > 0.85$ 则可认为条件独立。其中预测岩溶点的栅格数

$$N[K]_p = \sum_{i=1}^m P_i N[i] \quad (11)$$

式中: m ——各证据图层存在状态的组合个数;

P_i ——第 i 种组合状态下的后验概率;

$N[i]$ ——第 i 种组合状态下的栅格数。

本文根据 ArcGIS 软件中后验概率图的属性可知组合状态有 14 种,通过计算可知 $N[K]_p = 158$ 。即

$$\frac{N[K]}{N[K]_p} = \frac{157}{158} = 0.99 > 0.85 \text{ 满足条件独立性检验。}$$

2.3.2 危险区划分

通过 ArcGIS 软件生成岩溶发育的后验概率图,岩溶发育的地方容易产生岩溶塌陷,尤其是在公路路基施工设备等增加地面荷载的情况下,所以在施工过程中应该提高警惕。在本文中岩溶发育后验概率图也可叫做岩溶塌陷风险后验概率图。后验概率图在分级过程中需要确定分级阈值,通常采用 CAPP(Cumulative Area—Posterior Probability) 曲线的拐点确定阈值^[17-18]。如图 2 所示,考虑到先验概率为 0.015,则优先选择离先验概率最近的拐点,阈值分别为 0.007 6、0.014 2、0.022 0。则将后验概率分四级,分别对应稳定、较稳定、较危险、危险(图 3)。

2.4 ROC 精度评价

本文采用 ROC (receiver operating characteristic curve) 曲线^[19-20]进行岩溶预测准确性评价。ROC 预测曲线横坐标假阳性为预测岩溶区域(不包括真实岩溶区域)百分比,纵坐标真阳性为实际岩溶区域百分

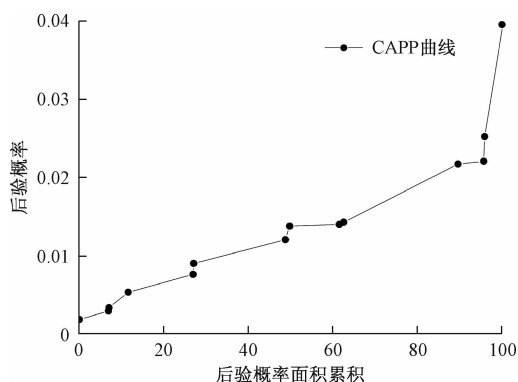


图2 后验概率面积频率曲线

Fig.2 The cumulative area posterior probability curve

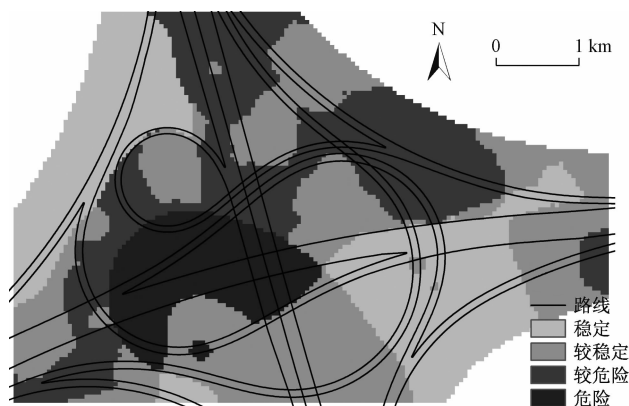


图3 岩溶塌陷风险后验概率图

Fig.3 The posteriori probability map showing the risk of karst collapse

比。ROC 曲线下面积 (AUC, area under curve) 为预测概率 (图4), 预测概率为 66.2%。

在公路路基岩溶发育区, 引入常用在矿产资源预测中的证据权模型, 定量的分析计算每个证据因子的权重, 并据此得出线性公路路基岩溶发育强度分区图, 由于人类工程活动易引发岩溶塌陷, 公路路基岩溶发

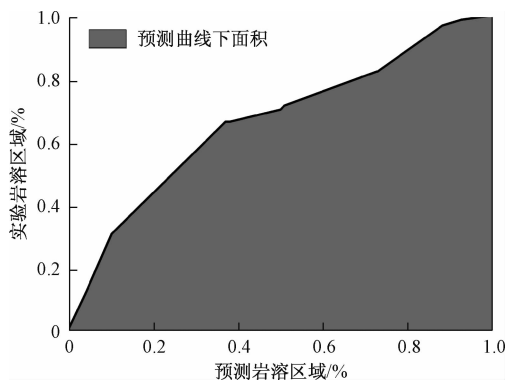


图4 ROC 预测曲线

Fig.4 The ROC curve

育强度分区图也可叫做人类工程作用下公路路基岩溶塌陷发生危险分区图。危险分区图划分为四个区, 分别为稳定 (0.001 8 ~ 0.007 6)、较稳定 (0.007 6 ~ 0.014 2)、较危险 (0.014 2 ~ 0.022 0)、危险 (0.021 9 ~ 0.039 3)。其中稳定区占 27.1%、较稳定区占 35.4%、较危险区占 32.9%、危险区占 4.6%, 可根据后验概率图, 注意危险区施工。根据 ROC 的精度评价, 预测成功率为 66.2% (图4)。岩溶最发育的地方基本上都在危险区, 并结合预测成功率可知该分区图基本符合实际结果。

3 结论

(1) 需要指出的是, 岩溶发育强度预测和岩溶塌陷预测略有不同, 一个是以研究区内已知岩溶发育点为训练点, 一个是以研究区内已知岩溶塌陷为训练点。在本研究区内岩溶塌陷点基本不存在, 所以预测岩溶发育强烈区在人类工程作用下为岩溶塌陷危险区。并且本文将岩溶发育强烈区作为公路路基施工过程中容易塌陷的区域, 需注意做好防范措施。如果岩溶塌陷的训练点足够多, 可以直接预测岩溶塌陷危险区。影响岩溶发育的因素有很多, 地表水流域, 地下水变化等, 但是由于数据缺少, 所以无法进行计算。并且采用的是岩溶钻孔数据, 钻孔数据具有很强的目的性, 随机性不够强。如有条件, 可进行岩溶塌陷危险区预测。

(2) 在进行证据因子优选时, 每个证据图层几乎都有多级分区, 证据因子优选后, 每个证据图层只有两种状态, 这种情况就忽略了证据层中其他分区的状态, 这就造成了最终结果的系统误差, 这是证据权模型的弊端。为了解决这种弊端, 成秋明等^[21]提出模糊证据权模型, 这样就可以最大限度利用证据图层中的信息。在计算证据条件独立性检验时, 运用的 omnibus test 检验方法是一种近似的检验, 大致符合条件独立性。

参考文献:

- [1] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
TANG Huiming. Engineering geology foundation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [2] 雷明堂. 地理信息系统 (GIS) 在岩溶塌陷评价中的应用[J]. 中国岩溶, 1994, 13(4): 351-356.
LEI Mingtang. Application of GIS to evaluation of karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 1994, 13(4): 351-356.
- [3] 曾斌, 杨木易, 邵长杰, 等. 基于层次分析法的杭长

- 高速岩溶塌陷易发性评价[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(1): 29-38.
- ZENG Bin, YANG Muyi, SHAO Changjie, et al. Susceptibility assessment of karst collapse of Hangchang expressway projects based on analytic hierarchy process [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(1): 29-38.
- [4] 王恒恒, 张发旺, 郭纯青, 等. 基于层次分析法的城市岩溶塌陷危险性评价—以武汉市南部为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(6): 667-673.
- WANG Hengheng, ZHANG Fawang, GUO Chunqing, et al. Urban karst collapse hazard assessment based on analytic hierarchy process: An example of southern Wuhan City [J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(6): 667-673.
- [5] 金艳珠, 谈树成, 虎雄岗, 等. 基于层次分析法与GIS相结合的岩溶塌陷地质灾害易发性分区评估——以云南省师宗县为例[J]. 热带地理, 2012, 32(2): 173-178.
- JIN Yanzhu, TAN Shucheng, HU Xionggang, et al. Geo-hazard susceptibility zoning evaluation of karst collapse based on the combination of AHP and GIS: a case study of Shizong, Yunnan [J]. Tropical Geography, 2012, 32(2): 173-178.
- [6] 周国清, 何素楠, 陈昆华, 等. 模糊层次分析法对岩溶塌陷易发程度的评估—以广西来宾市吉利村为例[J]. 城市勘测, 2013(5): 155-159.
- ZHOU Guoqing, HE Sunan, CHEN Kunhua, et al. FAHP to evaluate prone degree of karst collapse: a case study of Laibin, Jili in Guangxi [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(5): 155-159.
- [7] 全望永, 方星. 铜陵小街地区岩溶塌陷模糊综合评判[J]. 中国岩溶, 1992, 11(4): 297-306.
- QUAN Wangyong, FANG Xing. The comprehensive fuzzy evaluation of karst collapse in Xiaojie of Tongling, Anhui Province [J]. Carsologica Sinica, 1992, 11(4): 297-306.
- [8] 武运泊, 王运生, 曹文正. 基于AHP—模糊综合评判的岩溶塌陷危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 43-48.
- WU Yunbo, WANG Yunsheng, CAO Wenzheng. Risk evaluation of karst collapse based on AHP & fuzzy comprehensive evaluation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 43-48.
- [9] 李光辉, 潘懋, 杨志双, 等. 基于灰色聚类法的鞍山城区岩溶塌陷危险性区划[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(增刊): 75-79.
- LI Guanghui, PAN Mao, YANG Zhishuang, et al. Karst collapse hazard zonation based on grey clustering method in the city zone of Anshan [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(S): 75-79.
- [10] 贺玉龙, 杨立中, 黄涛. 人工神经网络在岩溶塌陷中的应用研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(4): 86-90.
- HE Yulong, YANG Lizhong, HUANG Tao. Research on application of artificial neural network in the prediction of karst collapse [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(4): 86-90.
- [11] 周国清, 陈昆华, 何素楠, 等. 基于逻辑回归模型的来宾市岩溶塌陷敏感性评价[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(6): 36-40.
- ZHOU Guoqing, CHEN Kunhua, HE Sunan, et al. Study on karst collapse susceptibility assessment based on logistic regression model: a case study of Labin City [J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(6): 36-40.
- [12] 赵增玉, 潘懋, 梁河. 二值证据权(Wofe)模型岩溶塌陷区划研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(4): 594-600.
- ZHAO Zengyu, PAN Mao, LIANG He. Binary weights of evidence (Wofe) modeling and its application to zonation of karst collapse [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(4): 594-600.
- [13] BONHAM-CARTER G F, AGTERBERG F P, WRIGHT D F. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11): 1585-1592.
- [14] FREDERIK P, AGTERBERG. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation [J]. Nonrenewable Resources. 1992, 1(1): 39-50.
- [15] EMMANUEL JOHN M, CARRANZA. Weights of evidence modeling of mineral potential: a case study using small number of prospects, Abra, Philippines [J]. Natural Resources Research, 2004, 13(3): 173-187.
- [16] 范强, 巨能攀, 向喜琼, 等. 证据权法在滑坡易发性分区中的应用—以贵州桐梓河流域为例[J]. 灾害

- 学,2015,30(1):124-129.
- FAN Qiang, JU Nengpan, XIANG Xiqiong, et al. Application of weights of evidence method in landslide susceptibility zoning-a case study on Tongzi river basin in Guizhou[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1):124-129.
- [17] BOLENEUS D E, RAINES G L, CAUSEY J D. Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Washington State using weights of evidence GIS modeling [Open-File Report 01-501, USGS] [R]. 2001.
- [18] 秦喜文,张树清,李晓峰,等. 基于证据权重法的丹顶鹤栖息地适宜性评价[J]. 生态学报, 2009, 29(3):1074-1082.
- QIN Xiwen, ZHANG Shuqing, LI Xiaofeng, et al. Assessment of red-crowned crane's habitat suitability based on weights of evidence [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3):1074-1082.
- [19] HANLEY J A, MCNEIL B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve [J]. Radiology, 1982, 143(1):29-36.
- [20] 付圣,陈丽霞,黎丰收,等. 鄂西南山区小区域大比例尺滑坡灾害易发性及其精度评价[J]. 山地学报, 2017, 35(4):517-526.
- FU Sheng, CHEN Lixia, LI Fengshou, et al. Large scale landslides susceptibility and accuracy assessment in mountainous counties [J]. Mountain Research, 2017, 35(4):517-526.
- [21] CHENG Qiuming, AGTERBERG F P. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping [J]. Natural Resources Research, 1999, 8(1):27-36.

2017年部分地质学类期刊主要指标

期刊名称	单项指标排名				他引率	综合指标排名
	影响因子	排名	总被引频次	排名		
地质论评	2.354	1	3 285	5	0.87	3
地质学报	2.253	2	6 162	2	0.85	1
石油实验地质	2.177	3	2 092	10	0.84	5
第四纪研究	1.972	4	2 817	6	0.62	11
岩石学报	1.459	5	9 034	1	0.82	2
沉积学报	1.202	6	3 451	4	0.94	4
地质与勘探	1.201	7	1 886	11	0.73	23
古地理学报	1.176	8	1 420	18	0.88	12
矿床地质	1.101	9	2 566	8	0.88	8
中国地质	1.061	10	2 632	7	0.91	6
现代地质	1.000	11	2 133	9	0.86	9
中国岩溶	0.988	12	1 074	23	0.69	24
地层学杂志	0.941	13	734	29	0.84	21
岩矿测试	0.848	14	1 183	22	0.88	18
大地构造与成矿学	0.817	15	1 369	19	0.92	10
高校地质学报	0.732	16	1 612	13	0.97	12
地质通报	0.708	17	3 677	3	0.91	7
水文地质工程地质	0.693	18	1 598	14	0.82	20
世界地质	0.679	19	791	26	0.69	32
中国地质灾害与防治学报	0.675	20	766	27	0.80	27
岩石矿物学杂志	0.673	21	1 298	21	0.93	15
工程地质学报	0.663	22	1 598	14	0.87	22
地质科技情报	0.634	23	1 615	12	0.81	19
矿物岩石	0.628	24	915	24	0.92	16
地质科学	0.585	25	1 521	17	0.94	14
物探与化探	0.578	26	1 359	20	0.74	32
海洋地质与第四纪地质	0.544	27	1 597	16	0.86	17
地质力学学报	0.451	28	556	31	0.76	26
古生物学报	0.419	29	617	30	0.75	30
微体古生物学报	0.359	30	337	36	0.76	31

本表数据引自《2018年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(中国科学技术信息研究所编)。